



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y

CARTOGRAFÍA

TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA

PROYECTO FIN DE CARRERA

OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN RECEPTORA EN LAS ESTACIONES SÍSMICAS DE BANDA ANCHA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL



Madrid, marzo de 2016

Alumno: Pablo Bouzón Ramos

Tutor: Dr. Juan José Rueda Núñez

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
AGRADECIMIENTOS.....	7
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	9
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivo	12
1.3. Antecedentes	16
CAPÍTULO 2: FUNCIÓN RECEPTORA. FUNDAMENTOS	19
2.1. ¿Qué es la función receptora?	21
2.2. Cálculo de la función receptora.....	21
2.2.1. Rotación de ejes	22
2.2.2. Deconvolución en el dominio de la frecuencia	23
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN RECEPTORA	29
3.1. Selección de telesismos.....	32
3.2. Segmentación	36
3.3. Revisión de telesismos	38
3.4. Cálculo de la función receptora.....	41
CAPÍTULO 4: DATOS	51
4.1. Selección de sismos	53
4.1.1. Criterios	53
4.1.2. USGS	53
4.1.3. Segmentación	57
4.1.3.1. <i>Red Sísmica Nacional</i>	57
4.1.4. Visualización	61
4.2. Picado de la llegada del Telesismo	63
CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE LA FUNCIÓN RECEPTORA	65
5.1. Cálculo de las funciones receptoras de las estaciones.....	67
CAPÍTULO 6: OBTENCIÓN DEL MODELO DE VELOCIDAD MEDIANTE INVERSIÓN DE LA FUNCIÓN RECEPTORA PARA LA ESTACIÓN DE TOBARRA	73
6.1. Inversión de la función receptora para obtener el modelo de la velocidad en la estación de Tobarra	75
6.1.1. Inversión	75

6.1.2. Resultados	77
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	81
REFERENCIAS.....	85
ANEXOS.....	89
ANEXO I. Parámetros focales (NEIC) de los terremotos utilizados.....	91
ANEXO II. Resultados de las funciones receptoras calculadas para cada terremoto.....	99
ANEXO III. Resultados de las funciones receptoras calculadas para cada estación.....	287
ANEXO IV. Modelo inicial de velocidad AK135.....	465
ANEXO V. Modelo de velocidad de la onda S obtenido mediante la inversión de las funciones receptoras obtenidas para la estación ETOB (Tobarra, Albacete).....	471

RESUMEN

La estructura de velocidad en los primeros metros debajo de una estación sísmica produce un cierto efecto sobre el sismograma que ésta registra, dicho efecto se denomina función receptora. Si se conoce esta función, es posible, mediante modelización, obtener esa estructura de velocidad.

La onda P que genera un telesismo, queda “atrapada” en los últimos kilómetros de su trayectoria en la estructura próxima a la estación que la registra, reverberando entre las discontinuidades de la misma y convirtiéndose, en algunas partes, en onda S. La diferencia de registro existente entre el sismograma del rayo no atrapado (componente vertical del registro) y el producido por este fenómeno (componente radial), sería la función receptora.

En este proyecto, se pretende obtener mediante la técnica de Langston (1979), las funciones receptoras de las 55 estaciones que forman la Red Sísmica de banda ancha del Instituto Geográfico Nacional, con el fin de que en trabajos venideros, sea posible conocer de una manera más realista, la estructura de la corteza terrestre bajo el territorio español.

Para la obtención de estas funciones, será necesario trabajar con un conjunto de sismogramas registrados por estaciones de banda ancha a partir de telesismos cuyos parámetros focales reúnan una serie de condiciones, definidas y detalladas ampliamente en esta memoria.

Tras un proceso de selección, que será constante a lo largo de todo este trabajo, se van a emplear para el cálculo de las funciones receptoras, un total de 5231 sismogramas, generados por 186 telesismos.

Para terminar, a modo de ejemplo y con el objetivo de mostrar la finalidad para la que se ha llevado a cabo este proyecto, se procederá a realizar la inversión de la función receptora obtenida para una de las estaciones sísmicas de la red, obteniendo así, un modelo de velocidades aproximado de la estructura de la litosfera existente bajo dicha estación.

PALABRAS CLAVE:

Función Receptora, Deconvolución, Telesismos, Inversión-Modelización, Red Sísmica Nacional de España.

ABSTRACT

The speed structure in the first layers under a seismic station produces an effect on the seismogram that is registered. This effect is known as receiver function. It is possible to obtain the speed structure if this function is detected through modelling.

The P wave, which generates a teleseism, gets trapped in the final kilometres of its trajectory in the nearby station structure, reverberating among its discontinuities and turning into a S wave. The registered difference between the not caught ray seismogram (vertical component of the register) and the one that is produced by this phenomenon (radial component) would be known as receiver function.

This project aims to obtain, through the Langston technique (1979), the receiver function of the 55 stations that make up the Broadband Seismic Network of the National Geography Institute to get to know, in a more realistic way, the structure of the Earth's crust under the Spanish territory.

In order to obtain these functions, it will be necessary to work with a number of seismograms registered by the broadband stations whose focal parameters meet the requirements that are well defined and detailed in the development of this memory.

After selecting the appropriate data, that would be constant throughout the development of this project, we are going to apply a total of 5231 seismograms obtained by 186 teleseism to calculate the receivers functions.

To conclude, and with the aim of demonstrating the purposes and uses that lie behind the development of this project, we will reverse the receiver function for one of the seismic stations, obtaining a approximate speeds' model of the lithosphere structure that can be found under the previously mentioned station.

KEY WORDS:

Receiver Function, Deconvolution, Teleseism, Inversion-Modelling, Spanish Seismic National Network.

AGRADECIMIENTOS

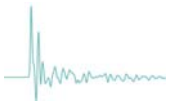
Al Dr. Rober B Hermann, de la Universidad de San Luis, Misuri, por el software RFTN96 sin el cual no podría haberse realizado este trabajo. Así como al Dr. Paul Wessel, por la herramienta Generic Mapping Tools, empleada en la edición de la cartografía que acompaña esta memoria.

A mi tutor, Juan José Rueda Núñez, por su dedicación y compromiso. Ha sido un verdadero placer trabajar contigo, espero haber estado a la altura.

A mis padres, Natividad y Carlos, por el esfuerzo que habéis realizado durante todos estos años para que yo haya podido llegar hasta aquí. Me siento muy orgulloso de vosotros. GRACIAS.

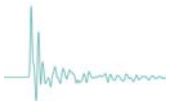
A mi “familia elegida”, por haberme dejado vivir con vosotros los mejores años de mi vida. No podía haber tenido mejores compañeros de viaje.

A mi chica, Lidia, por tu facilidad para hacer fácil lo difícil. Sin duda, el mejor regalo que me ha brindado la universidad. Gracias por ser tú.



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN





1.1. Introducción

Las funciones receptoras son series temporales, registradas en sismogramas de tres componentes, que muestran la respuesta relativa de la estructura de la litosfera bajo la estación que la registra. Ésta se compone de las conversiones de la onda P de un telesismo, a ondas S, provocadas por el contraste de impedancias entre las capas que forman dicha estructura, ya que dicho contraste provoca que la señal quede atrapada, reverberando entre las discontinuidades.

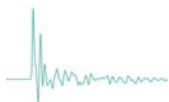
La naturaleza de la función receptora la convierte en una herramienta muy interesante en sismología, siendo numerosos los sismólogos que llevan décadas estudiando y empleando la función receptora en multitud de estudios de investigación. Entre los más importantes cabe destacar los artículos de *Phinney* (1964), *Langston* (1979), *Owens et al.* (1984) y *Ammon* (1991).

Aunque los primeros trabajos se centraban en el continente Americano, pocos años más tarde, comenzó a estudiarse la función receptora dentro de nuestras fronteras, con las aportaciones de investigadores como *Juliá et al.* (1998) y, más recientemente, *Díaz y Gallart* (2009).

A pesar de dichas aportaciones, aún no se ha realizado una explotación de la función receptora de todas las estaciones de banda ancha de la Red Sísmica del Instituto Geográfico Nacional de España, como se va a realizar en este proyecto. En él, se llevará a cabo el procesamiento de multitud de sismogramas, producidos por un gran número de telesismos, con el objetivo de calcular la función receptora promedio de cada una de las 55 estaciones que forman la Red Sísmica Nacional, para que pueda ser empleada en estudios sucesivos.

Se pretende recoger en este trabajo la capacidad como elemento de apoyo que en un proyecto de investigación sismológica más amplio, y que se escapa a sus conocimientos y funciones, tiene el Ingeniero Técnico en Topografía, por su gran experiencia en el tratamiento de datos y sus conocimientos básicos de las técnicas geofísicas. Para ello se realizarán funciones tales como:

- Selección de los telesismos que cumplen los requisitos mínimos para el estudio.
- Visualización de los sismogramas registrados de los telesismos válidos y eliminación de los mal registrados.
- Cálculo de las funciones receptoras.
- Organización de la base de datos generada.



- Inversión de las funciones receptoras para una de las estaciones sísmicas de banda ancha del IGN, con el fin de obtener el modelo de velocidad de la litosfera bajo dicha estación.

1.2. Objetivo

Este proyecto tiene como objetivo la obtención, mediante la técnica de *Langston* (1979), de la función receptora en cada una de las 55 estaciones de banda ancha de la Red Sísmica del Instituto Geográfico Nacional (Figura 1.1).

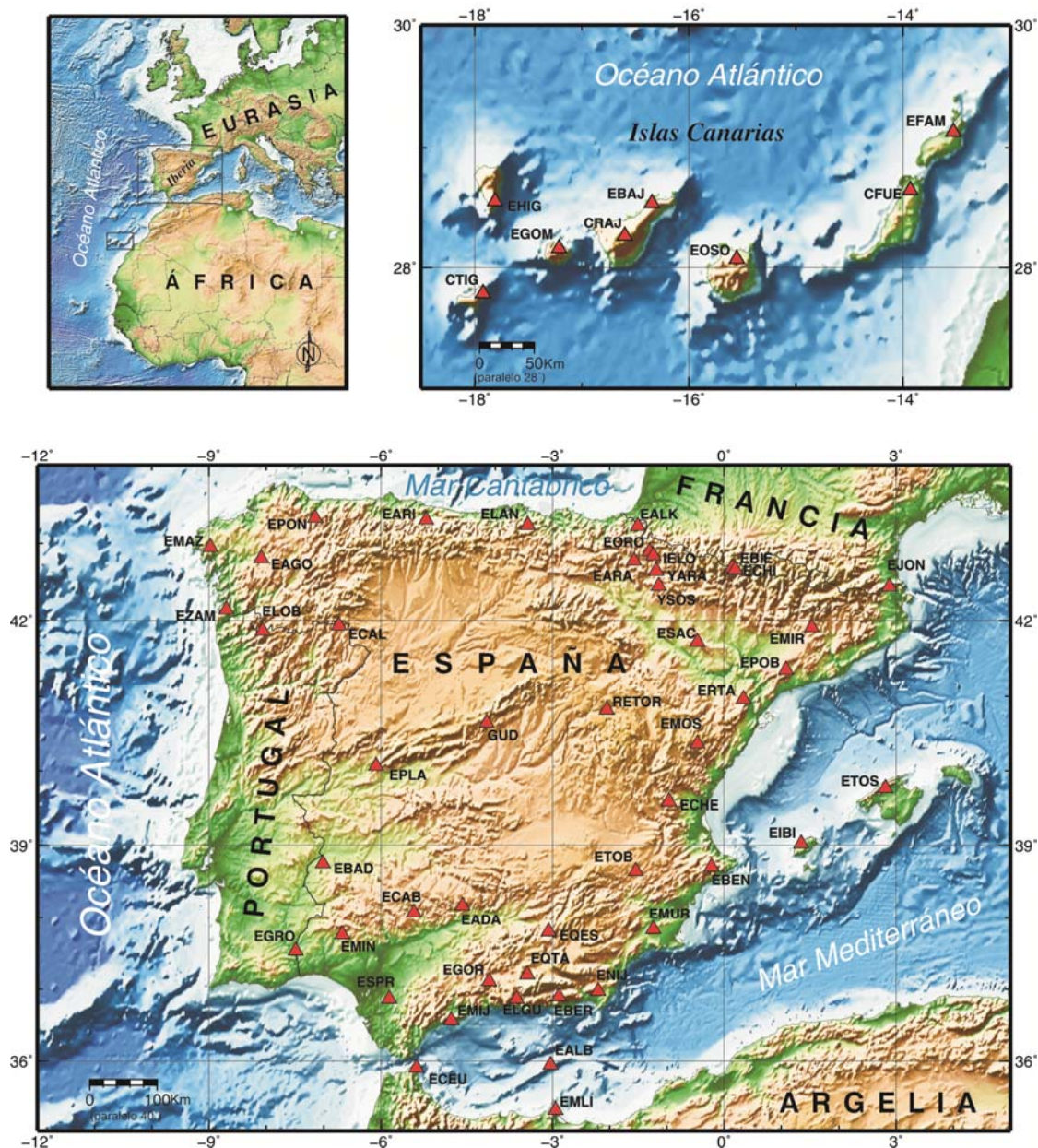


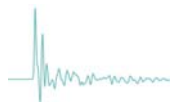
Figura 1.1. Estaciones de la Red Sísmica de banda ancha del Instituto Geográfico Nacional



Dichas estaciones, junto con su localización y fecha de alta en el servicio, se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Estaciones de Banda Ancha de la Red Sísmica del Instituto Geográfico Nacional, junto con sus coordenadas geográficas y la fecha de alta en el servicio.

ESTACIÓN	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	FECHA ALTA
CFUE	Fuerteventura (Fuerteventura) IGN	28,6468	-13,9359	12/11/2004
CRAJ	Montaña Rajada (Tenerife) IGN	28,2649	-16,5969	10/06/2004
CTIG	Tigirote (Isla Hierro) IGN	27,7882	-17,9221	17/08/2009
EADA	Adamuz (Córdoba) IGN	38,1673	-4,5771	21/12/2001
EAGO	Agolada (Pontevedra) IGN	42,8027	-8,0892	24/03/2010
EALB	Isla de Alborán (Almería) IGN	35,9399	-3,0343	01/04/2001
EALK	Alkurruntz (Navarra) IGN	43,2197	-1,5071	30/07/2003
EARA	Aranguren (Navarra) IGN	42,7727	-1,5797	01/07/2005
EARI	Arriondas (Asturias) IGN	43,3012	-5,2099	28/11/2001
EBAD	Badajoz (Badajoz) IGN	38,7556	-7,0133	01/12/2000
EBAJ	Bajamar (Tenerife) IGN	28,5399	-16,3434	29/03/2001
EBEN	Beniardá (Alicante) IGN	38,7038	-0,2250	29/09/2001
EBER	Berja (Almería) IGN	36,8979	-2,8896	20/06/2001
EBIE	Bielsa (Huesca)	42,6862	0,1428	07/11/2001
ECAB	El Cabril (Córdoba) IGN	38,0753	-5,4186	21/11/2003
ECAL	Calabor (Zamora) IGN	41,9413	-6,7371	07/12/2001
ECEU	Ceuta IGN	35,8978	-5,3768	11/04/2007
ECHE	Chera (Valencia) IGN	39,5908	-0,9677	26/11/1987
ECHI	Chisagües (Huesca) IGN	42,6646	0,1946	08/12/2010
EFAM	Famara (Lanzarote) IGN	29,1275	-13,5295	07/06/2002
EGOM	La Gomera (La Gomera) IGN	28,1594	-17,2096	19/05/2003
EGOR	Sierra Gorda, Loja (Granada) IGN	37,1101	-4,1096	03/02/2011
EGRO	El Granado (Huelva) IGN	37,5342	-7,4831	21/12/2001
EHIG	Higuera (La Palma) IGN	28,5567	-17,8062	18/01/2002
EIBI	Ibiza/Eivissa (Illes Balears) IGN	39,0269	1,3436	06/07/2001
EJON	La Jonquera (Girona)	42,4487	2,8886	22/03/2002
ELAN	Lanestosa (Bizkaia) IGN	43,2317	-3,4340	31/03/2003
ELGU	Los Guajares (Granada) IGN	36,8678	-3,6266	27/10/2011
ELOB	Lobios (Ourense) IGN	41,8674	-8,0611	09/05/2001
EMAZ	Mazaricos (A Coruña) IGN	42,9490	-8,9765	19/07/2002
EMIJ	Mijas (Málaga) IGN	36,5645	-4,7727	02/07/2004
EMIN	Mina Concepción (Huelva)	37,7675	-6,6724	04/12/2001
EMIR	El Miracle (Lleida) IGN	41,9144	1,5258	30/10/2001
EMLI	Ciudad de Melilla (Melilla) IGN	35,3000	-2,9500	21/06/2002
EMOS	Mosqueruela (Teruel) IGN	40,3639	-0,4721	09/03/2001
EMUR	La Murta (Murcia) IGN	37,8422	-1,2405	31/10/2000
ENIJ	Nijar (Almería) IGN	36,9715	-2,2070	26/04/1985
EORO	Oroz Betelu (Navarra) IGN	42,8926	-1,3095	27/04/2007
EOSO	Osorio (Gran Canaria) IGN	28,0718	-15,5525	18/01/2002
EPLA	Plasencia (Cáceres) IGN	40,0642	-6,0803	29/08/1985



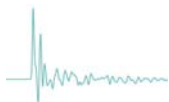
EPOB	Poblet (Tarragona) IGN	41,3527	1,0786	21/09/2001
EPON	Pontenova (Lugo) IGN	43,3270	-7,1494	28/11/2001
EQES	Quesada (Jaén) IGN	37,8028	-3,0711	19/06/2001
EQTA	Presa de Quentar (Granada) IGN	37,2050	-3,4399	01/08/2005
ERTA	Horta de Sant Joan (Tarragona) IGN	40,9567	0,3335	24/10/2000
ESAC	San Caprasio (Zaragoza) IGN	41,7219	-0,4693	24/10/2000
ESPR	Espera (Cádiz) IGN	36,8686	-5,8562	25/06/2002
ETOB	Tobarra (Albacete) IGN	38,6447	-1,5478	30/10/2000
ETOS	Escorca (Mallorca) IGN	39,7678	2,8144	30/05/2002
EZAM	Zamans (Pontevedra) IGN	42,1490	-8,6950	22/12/1986
GUD	Guadarrama (Madrid) IGN	40,6430	-4,1537	01/07/1979
IELO	Elcoad (Navarra) IGN/CHE	42,8432	-1,2366	18/07/2008
RETOR	Torete (Guadalajara) IGN	40,8195	-2,0552	17/05/2000
YARA	Arangoiti (Navarra) IGN/CHE	42,6477	-1,1902	11/12/2009
YSOS	Sos del Rey Católico (Zaragoza) IGN/CHE	42,4554	-1,1470	28/05/2010

Se realizará una primera selección de un gran número de telesismos, a nivel mundial, en la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) ya que cuenta con un catálogo sísmico mundial y de fácil acceso. De ella se podrá obtener, además, la información necesaria para llevar a cabo la segmentación de los sismogramas de cada telesismo. Este proceso consiste en la selección, dentro del registro continuo del tramo o segmento de sismograma necesario para el cálculo de la función receptora.

En esta primera selección, quedarán descartados todos aquellos telesismos que tuvieron lugar antes del 1 de enero de 2003, ya que es, a partir de esta fecha, cuando en el IGN se comienzan a registrar, de manera continua, sismogramas de tres componentes por medio de las estaciones de banda ancha. Además, en esta misma selección, se descartarán también los telesismos cuya magnitud sea inferior a 6,5 Mw. De este modo se garantizará, en gran medida, que en los sismogramas se aprecie, sin dificultad, la llegada de la onda P, y que se propague la suficiente energía como para que se exploren satisfactoriamente las distintas discontinuidades debajo de la estación.

Es necesario para este estudio que la onda P del telesismo incida lo más perpendicularmente posible a la estructura sobre la que se asienta la estación. El único modo de garantizar este hecho es considerar únicamente aquellos telesismos cuya distancia epicentral sea superior a 30° e inferior a 95°.

Debido a la distancia que separa el archipiélago canario del resto del territorio nacional, se decide distinguir dos zonas de estudio. Una que englobará las estaciones de la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla; y otra para las estaciones de las Islas Canarias. Por tanto, habrá de llevarse a cabo dos selecciones, tomando para cada una de ellas un centro promedio, a partir del cual, calcular las distancias epicentrales de



todos los telesismos. Este hecho provocará que haya telesismos que sean únicamente válidos para una de las zonas de estudio. Una vez realizada la explotación se obtienen un total de 187 telesismos para la primera zona y 132 para la segunda. Muchos de estos telesismos serán válidos para ambas zonas, siendo 216 el número de telesismos diferentes que participarán en este estudio.

A continuación, en las Figuras 1.2 y 1.3 se muestran los telesismos seleccionados para cada zona de estudio.

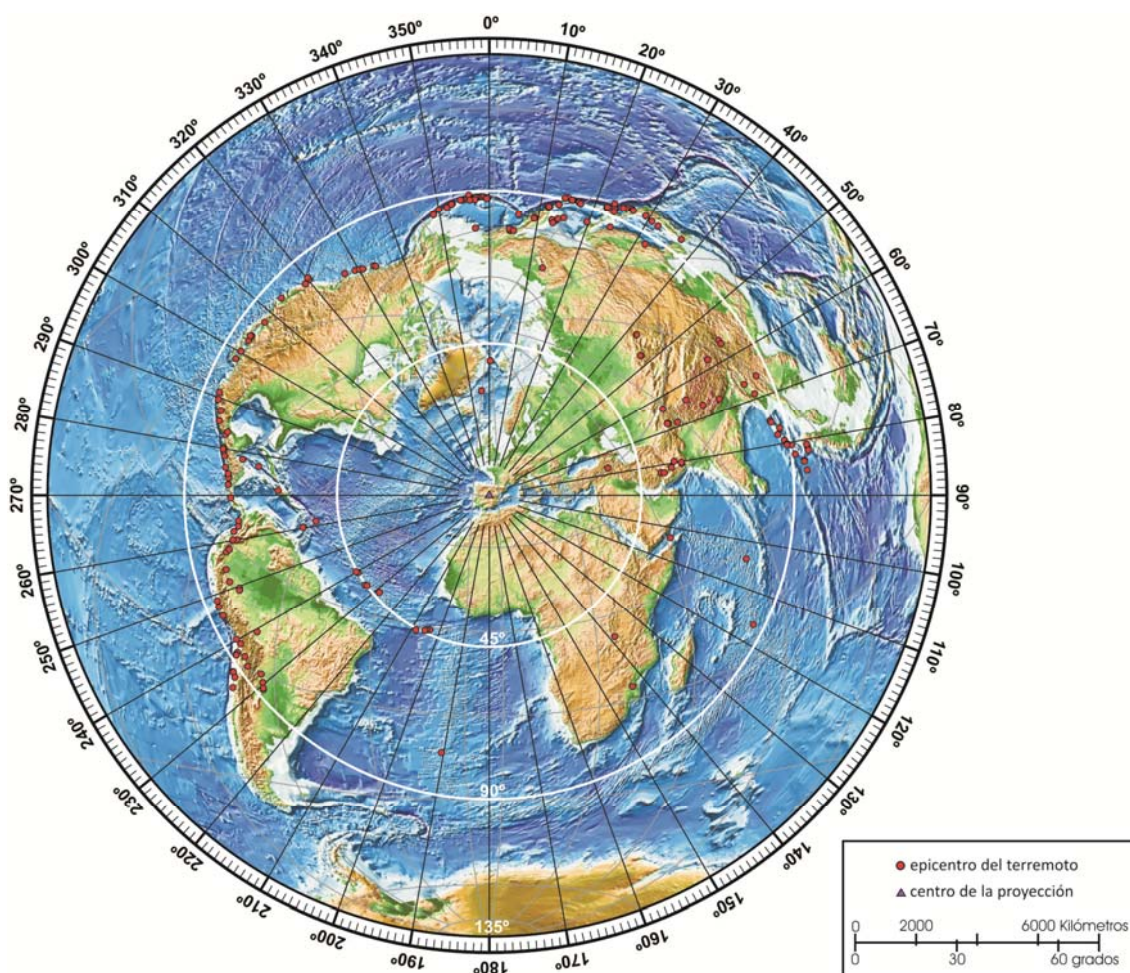


Figura 1.2: 187 telesismos empleados para el cálculo de la función receptora en la primera zona de estudio. Proyección acimutal equidistante centrada en las proximidades a Madrid ($\lambda -3^{\circ} 24' 41''$; $\phi 40^{\circ} 14' 24''$)

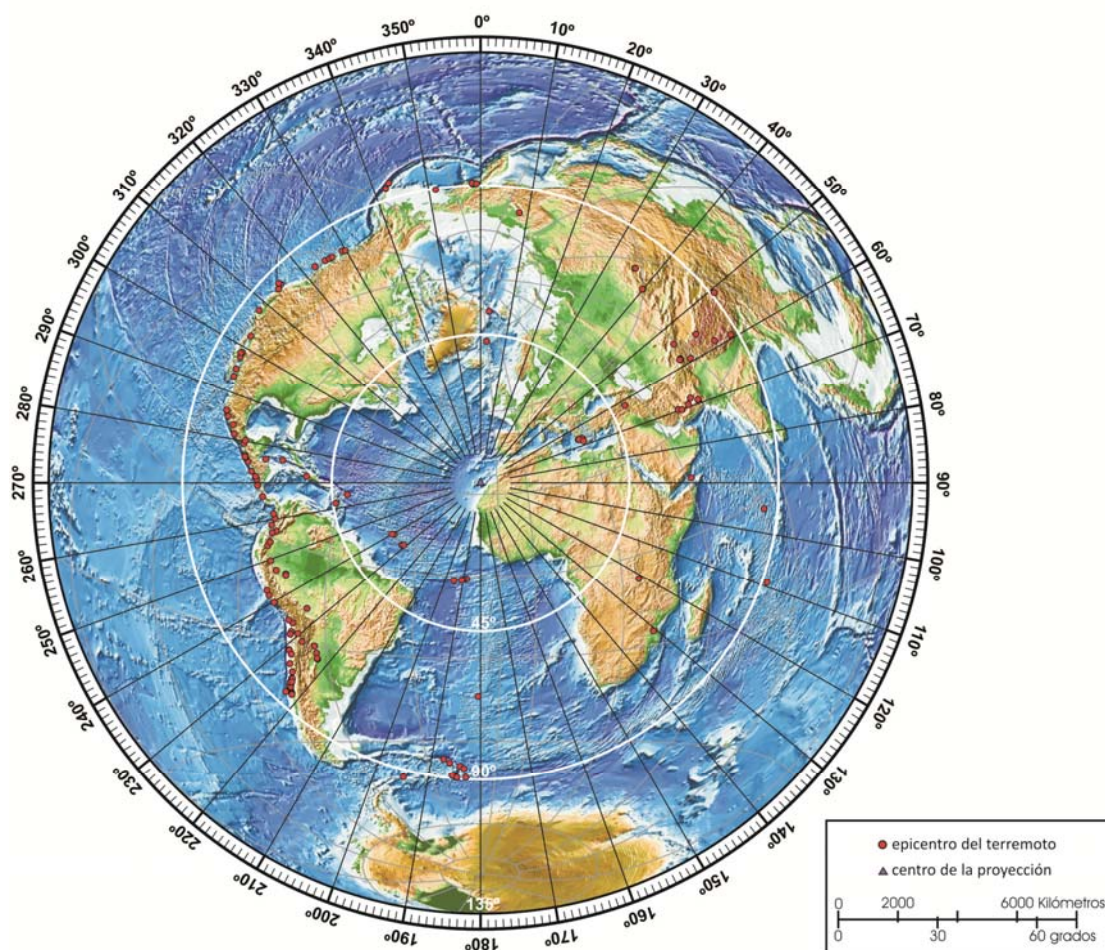


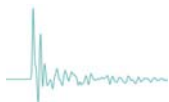
Figura 1.3: 132 telesismos empleados para el cálculo de la función receptora en la segunda zona de estudio. Proyección acimutal equidistante centrada en las proximidades a Gran Canaria (λ $-15^{\circ} 45' 00''$; ϕ $28^{\circ} 31' 01''$)

A partir de esos 216 telesismos, se construirá un catálogo de 5231 funciones receptoras que permita a investigadores en sismología, mediante trabajos de inversión y modelización, profundizar en el conocimiento de la estructura de la litosfera en la Península Ibérica, Islas Baleares e Islas Canarias.

A modo de ejemplo, para poder mostrar en qué consiste esta modelización, se llevará a cabo la inversión de las funciones receptoras obtenidas para una de las estaciones de la red, aquella que tenga mayor número de funciones receptoras y un mejor ajuste de las mismas.

1.3. Antecedentes

Son numerosos los artículos y trabajos que llevan por objeto la descripción o aplicación del método de la función receptora en todas sus vertientes. Aunque realmente, los que poseen mayor interés para la realización de este proyecto, son aquellos que emplean este método para la obtención de un modelo estructural de la corteza terrestre y el manto, ya sea como técnica principal o como técnica de apoyo o



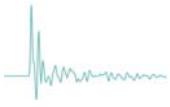
comparativa de otras técnicas como la gravimétrica. Por esta razón, ha sido fundamental la recopilación y el estudio de un gran número de estos artículos y trabajos, con el objetivo de una mejor comprensión y aprendizaje del método de la función receptora.

Los estudios más tempranos de la función receptora, como el de *Phinney* (1964), trabajaron en el dominio de la frecuencia, empleando el ratio de los espectros de amplitud para estimar el espesor de la corteza terrestre. Más adelante, *Langston* (1979) amplió el método para incluir información de la fase, mediante el uso de una relación en el dominio de la frecuencia y una transformación inversa de nuevo en el dominio del tiempo. Para estabilizar la deconvolución, empleó el llamado filtro de nivel de agua (*Clayton y Wiggings, 1976*) y un filtro de Gauss de paso bajo para eliminar el ruido de alta frecuencia, no filtrada por el filtro de nivel del agua.

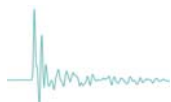
El método de la función receptora ha sido ampliamente estudiado y empleado por numerosos investigadores, destacando algunos artículos como el de *Owens et al.* (1984), que empleo dicho método para el estudio de la estructura de velocidades bajo la meseta de Cumberland (Tennessee); o el de *Ammon* (1991), en el que tiene como objetivo aislar los efectos del receptor en las ondas P, revisando el procedimiento llevado a cabo por *Langston* (1979).

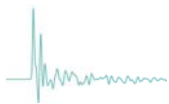
Aunque la gran mayoría de estos trabajos están basados en el estudio de la estructura de la litosfera en el continente americano, existen varios artículos cuya zona de estudio se encuentra dentro de nuestras fronteras o en sus proximidades. Destacan los trabajos como el de *Julià et al.* (1998), en el que estudia la estructura de la corteza terrestre bajo la cuenca del Ebro mediante la inversión de la función receptora de la estación sísmica de Poblet; o el de *Meijde et al.* (2003), en el que se estudia la estructura de la corteza bajo estaciones enclavadas en la región mediterránea. También *Díaz et al.* (2009 y 2012), emplean la función receptora para estudiar el modelo de velocidades bajo las estaciones del noreste peninsular, obteniéndose conclusiones sobre la confrontación entre las placas Ibérica y Euroasiática bajo los Pirineos occidentales.

Cabe destacar que nunca se han obtenido datos de la función receptora que permitan modelizar la estructura de la litosfera terrestre de todo el territorio español de una forma conjunta, como se pretende realizar en este proyecto.



CAPITULO 2: FUNCIÓN RECEPTORA. FUNDAMENTOS





2.1. ¿Qué es la función receptora?

Las funciones receptoras (FR) son series temporales que nos muestran la respuesta relativa de la estructura de la litosfera terrestre bajo la estación. La respuesta se pone de manifiesto gracias al contraste de impedancias entre las capas que forman dicha estructura, siendo la impedancia el producto de la velocidad de propagación de las ondas en una capa por la densidad del medio que forma dicha capa.

La onda P generada por un terremoto cuyo epicentro se encuentra a una distancia de entre 30° y 95° , incide de manera vertical a la estructura bajo la estación que la registra. El contraste de impedancias provoca que la onda P quede reverberando entre las capas que forman dicha estructura. Si se eliminan los efectos, que acompañan a la señal, fruto de la fuente y de la trayectoria, se puede aislar la función receptora de la misma, cuya forma estará condicionada por las características propias de las capas que componen la estructura bajo la estación. Por esta razón se considera a las funciones receptoras como una herramienta fundamental para el estudio de la corteza y las interfases del manto.

2.2. Cálculo de la función receptora

Como ya se ha comentado anteriormente, las funciones receptoras de ondas P son series temporales que en su señal contienen información de las diferentes discontinuidades de la corteza y el manto superior, siendo esto posible debido al contraste de impedancias existente en el medio. La señal está compuesta por fases convertidas P a S que reverberan en las estructuras que se encuentran bajo la estación, como se muestra en la Figura 2.1. (izquierda). La amplitud y el tiempo de llegada de estas ondas (Figura 2.1. derecha) que quedan “atrapadas” en la estructura, nos proporcionan información del contraste de velocidades de propagación en la litosfera bajo el receptor.

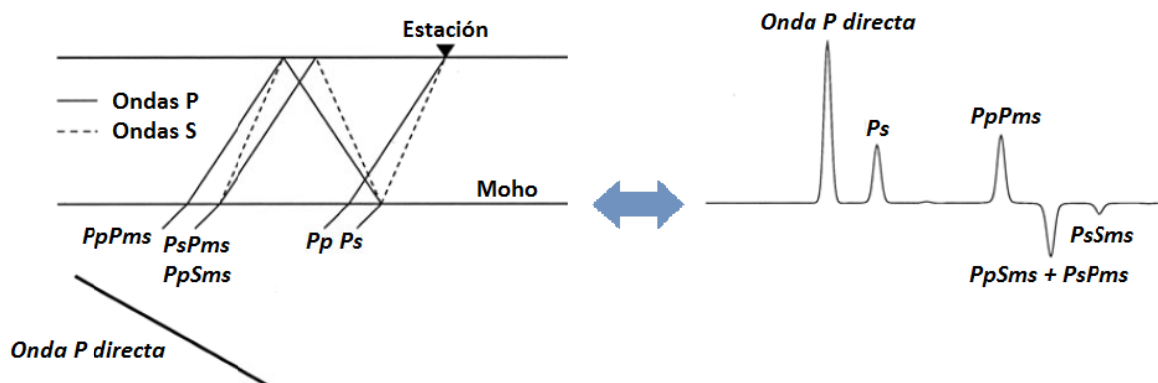
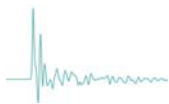


Figura 2.1: Registro idealizado de una FR aislada con las llegadas de las fases convertidas P a S (derecha) y las trayectorias a través del modelo de los rayos de dichas fases (izquierda).



El primer paso a llevar a cabo en el cálculo de la función receptora será realizar una integración para transformar el registro de velocidad procedente de los sensores de banda ancha en un registro en desplazamiento.

Una vez realizada esta integración se llevara a cabo la rotación.

2.2.1. Rotación de ejes

Como parte del proceso previo a la obtención de la función receptora y con la finalidad de simular una orientación del sensor en dirección preferencial y de mayor potencial de la onda P, se lleva a cabo una rotación de ejes.

Se rotará del sistema cardinal de registro ZNE (vertical, N-S y E-W) al sistema ZRT (vertical; radial, en dirección al hipocentro; y transversal, perpendicular a los dos anteriores), mediante el acimut estación-hipocentro (φ) y ángulo de incidencia (i) del telesismo. De esta manera la componente Radial registrará con la mayor energía la onda P y sus transformadas, debido a la naturaleza de ésta. En la Figura 2.2., se muestra un esquema de las componentes de ambos sistemas.

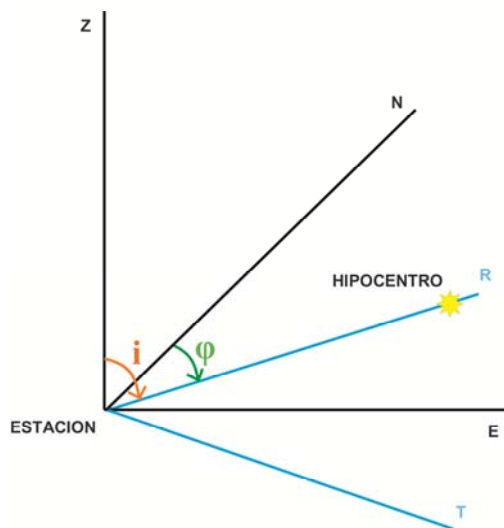


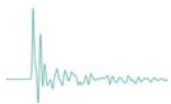
Figura 2.2. Rotación de los ejes del sistema de referencia cardinal (ZNE) de un telesismo al sistema de referencia ZRT, mediante el acimut estación-hipocentro (φ) y ángulo de incidencia (i).

En el origen del sistema se encuentra la estación.

Para realizar la rotación de los ejes ZNE a ZRT, se hará uso de dos matrices rotación

$$\begin{bmatrix} Z \\ NS \\ EW \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sen \varphi & 0 \\ -\sen \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \sen i \\ 0 & -\sen i & \cos i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ Transversal \\ Radial \end{bmatrix}$$

2.1



donde φ es el acimut de la dirección estación-epicentro, i es el ángulo de incidencia y los vectores [Z NS EW] y [Z Transversal Radial] son los datos observados y rotados, respectivamente.

2.2.2. Deconvolución en el dominio de la frecuencia

Antes de continuar con el cálculo de las funciones receptoras mediante la deconvolución de la señal, se debe definir brevemente el concepto de convolución en el registro de un terremoto.

El contraste de impedancias existente entre las diferentes capas que forman la litología de la Tierra y su geometría, es el causante de las diversas reflexiones que sufre la señal que se registra en un sismograma y que se transforma en cambios de amplitud y frecuencia en el registro. De este modo, se puede considerar al registro de un sismograma como la convolución entre la función fuente que origina la onda y el efecto que la trayectoria tiene sobre ella, definiéndose la convolución como un operador matemático. Si se lleva a cabo el proceso inverso, la deconvolución, se eliminarán los efectos de la fuente y la trayectoria que acompañan a los registros

En el dominio temporal, tanto la convolución como la deconvolución son procesos excesivamente complejos, mientras que en el dominio de la frecuencia, gracias al teorema de la convolución las operaciones equivalentes a éstas serían simplemente el producto y el cociente, respectivamente. Por esta razón se trabajará en el dominio frecuencial.

En la operación deconvolución se producen “ruidos” que hay que eliminar. *Langston* (1979) los detalla, y para corregirlos emplea los llamados filtros de agua (*Clayton y Wiggings*, 1976)

Suponiendo que el rayo sísmico (Figura 2.3) incide de forma vertical en una estructura de capas planas, las componentes del desplazamiento en la superficie, en función del tiempo, pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$D_Z(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_Z(t),$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_R(t),$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_T(t),$$

2.2

Donde $I(t)$ es la respuesta del instrumento al impulso unitario, $S(t)$ es la función que describe la fuente, $P(t)$ es la influencia de la trayectoria entre la fuente y la base de la estructura local, $E_Z(t)$, $E_R(t)$ y $E_T(t)$ son las funciones de transferencia de la estructura local de propagación en las direcciones vertical, radial y transversal, respectivamente, y $*$ es el operador “convolución”.

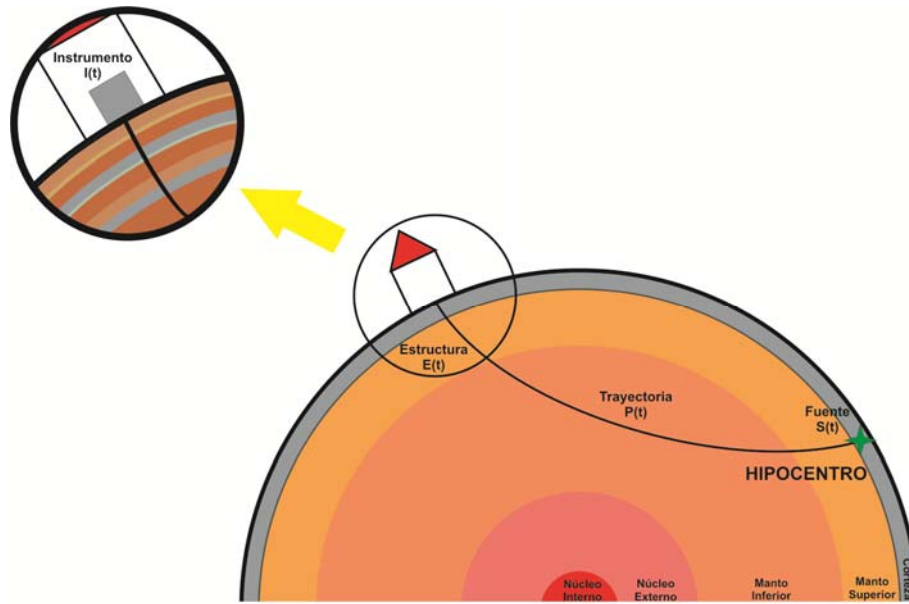
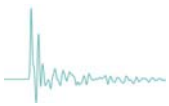


Figura 2.3. Componentes del desplazamiento de un telesismo.

Continuando con el método de *Langston* (1979), se propone que la respuesta vertical de la corteza, al no encontrar heterogeneidades laterales, es aproximadamente igual a

$$E_z(t) \approx \delta(t)$$

2.3

donde $\delta(t)$ representa la función delta de Dirac (respuesta al impulso unitario), de esta manera tenemos que el desplazamiento vertical en la estación puede reescribirse como:

$$D_z(t) = I(t) * P(t) * S(t) * \delta(t)$$

2.4

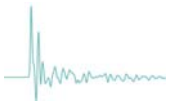
Esta aproximación será más precisa cuantos menos contrastes de velocidad en interfaces intermedias mayores a 2 km/s se tengan (*Langston*, 1979).

Llegados a este punto, y debido a que el proceso de deconvolución en el dominio del tiempo es muy laborioso, se realizará una transformación para que los registros, que están expresadas en el dominio del tiempo, lo estén en el dominio de la frecuencia, ya que en este dominio la deconvolución es simplemente la división.

Para llevar a cabo esta transformación se empleará la transformada discreta de Fourier,

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n}$$

2.5



dónde $x(n)$ es la función en el dominio del tiempo discreto (sismograma) y $X(\omega)$ la función en el dominio de la frecuencia.

Al llevar a cabo esta transformación, se conseguirá simplificar el proceso de deconvolución, ya que basándose en el Teorema de la Convolución del propio Fourier, que establece que *la convolución de las funciones en el dominio temporal es equivalente al producto de sus transformadas en el dominio de la frecuencia*, se puede decir que la deconvolución en el dominio de la frecuencia es la división de sus transformadas. Además, el valor de dicha transformada para $\delta(t)$ es igual a 1.

De este modo,

$$D_Z(t) = I(t) * S(t) * P(t) * \delta(t) \Rightarrow D_Z(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot 1$$

$$D_R(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_R(t) \Rightarrow D_R(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot E_R(\omega)$$

$$D_T(t) = I(t) * S(t) * P(t) * E_T(t) \Rightarrow D_T(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot E_T(\omega)$$

2.6

Y, relacionando los desplazamientos en las direcciones radial y tangencial con el desplazamiento en la dirección vertical, se obtiene,

$$\left. \begin{array}{l} D_Z(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot 1 \\ D_R(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot E_R(\omega) \end{array} \right\} E_R(\omega) \approx \frac{D_R(\omega)}{D_Z(\omega)}$$

$$\left. \begin{array}{l} D_Z(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot 1 \\ D_T(\omega) = I(\omega) \cdot S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot E_T(\omega) \end{array} \right\} E_T(\omega) \approx \frac{D_T(\omega)}{D_Z(\omega)}$$

2.7

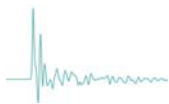
Con el propósito de filtrar el ruido de alta frecuencia se convoluciona el cociente espectral con una campana de Gauss, de tal manera que para las ecuaciones 2.7 se tendría,

$$E_R(\omega) \approx E'_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{D_Z(\omega)} G(\omega)$$

$$E_T(\omega) \approx E'_T(\omega) = \frac{D_T(\omega)}{D_Z(\omega)} G(\omega)$$

2.8

Donde $E_R(\omega)$ representa la FR radial, $E_T(\omega)$ la FR transversal y $G(\omega)$ es el espectro de la campana Gaussiana empleada como filtro.



El cociente mostrado en las Ecuaciones 2.7 puede llegar a ser inestable si el denominador es cero o tiende a ser 0, para evitar este problema se introduce en el cálculo un procedimiento planteado por Clayton y Wiggins (1976) llamado filtro de nivel de agua:

$$E'_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)\bar{D}_Z(\omega)}{\phi_{ss}(\omega)} G(\omega),$$

2.9

dónde

$$\phi_{ss}(\omega) = \max\{D_Z(\omega)\bar{D}_Z(\omega), c \max[D_Z(\omega)\bar{D}_Z(\omega)]\},$$

2.10

La constante c es el nivel de agua y $\bar{D}_Z(\omega)$ es el complejo conjugado de $D_Z(\omega)$. Este procedimiento ha demostrado dar muy buenos resultados cuando la calidad de los datos es buena (nivel de ruido bajo). El nivel de agua reemplaza los valores pequeños en el espectro por un valor constante. En la Figura 2.4. se muestra gráficamente este procedimiento.

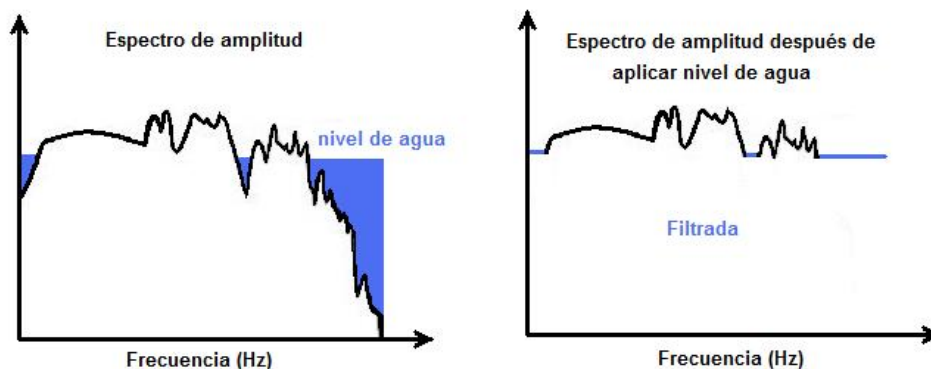


Figura 2.4. Representación gráfica de la aplicación filtro de nivel de agua.

La constante del filtro de nivel de agua se elige mediante prueba y error. Los valores típicos son: 0.0001, 0.001, 0.01 y 0.1, aunque normalmente el parámetro c toma el valor de 0.01 (Langston, 1979).

Las funciones receptoras correspondientes a eventos diferentes, también con diferentes azimutes entre la estación y el epicentro del telesismo, han de ser iguales, siempre y cuando la estructura de velocidades sobre la que se encuentra la estación sísmica no posea heterogeneidades laterales y se pueda suponer formada por capas planas. De hecho, se podrían sumar ese conjunto de funciones receptoras de la misma estación para identificar con mayor claridad las fases de dicha función (Figura 2.5.).

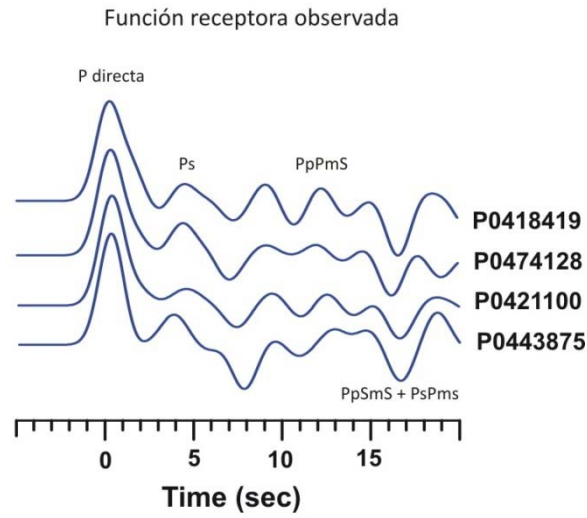
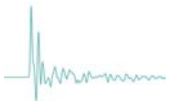
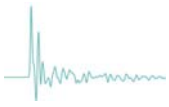
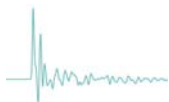


Figura 2.5.: Funciones receptoras calculadas para la estación de ETOB (Tobarra, Albacete) con el filtro 1.0. Junto a ellas, los EVIDs de los telesismos a las que pertenecen.



CAPITULO 3: METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN RECEPTORA





En este capítulo se va a describir todo el proceso llevado a cabo para calcular las funciones receptoras de las estaciones. Se describirán las pautas seguidas en dicho proceso, así como el software utilizado. En la Figura 3.1. se muestra un esquema de dicho procedimiento.

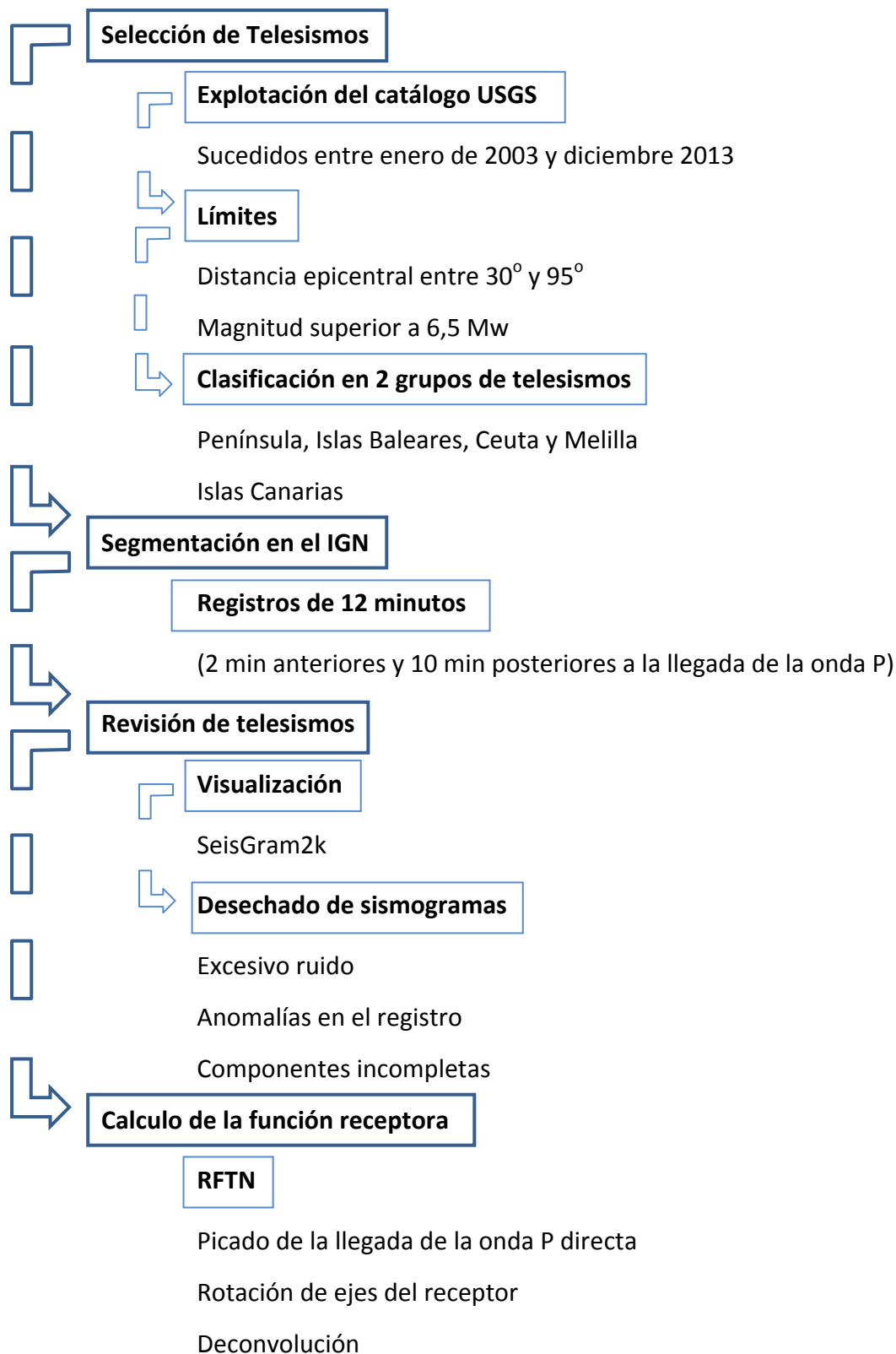


Figura 3.1. Esquema de la metodología seguida para el cálculo de la función receptora.



3.1. Selección de telesismos

Se debe comenzar por generar un listado en el que aparezcan todos los telesismos con los que se va a trabajar, acompañados de sus parámetros focales. Tanto los telesismos como su información los obtendremos del catálogo sísmico del *Servicio Geológico de Estados Unidos*, (United States Geological Survey, USGS) cuya dirección web es <http://www.usgs.gov/>. Pero antes de obtener esta información, es importante que se establezcan una serie de criterios acerca de las características que deben reunir estos telesismos, que garanticen obtener un resultado, lo más óptimo posible, del estudio.

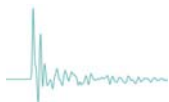
Para comenzar, se seleccionarán aquellos telesismos ocurridos a partir del año 2003, ya que es a partir de este año cuando el Instituto Geográfico Nacional ya cuenta con un gran número de estaciones sísmicas de banda ancha capaces de registrar de manera continua y almacenar digitalmente los sismogramas.

Por otro lado, otro requisito imprescindible que los telesismos deben cumplir es que la distancia epicentral hasta la estación sobre la que se realizará el cálculo no sea inferior a 30° ni tampoco superior a 95° . Con esto se garantiza que la llegada de la onda P directa a la estación se produzca de manera perpendicular a las capas que forman la estructura bajo dicha estación. Debido a las características del territorio nacional, las 55 estaciones que forman la Red Sísmica del IGN se van a dividir en dos subredes. La primera de ellas, con las estaciones de la Península Ibérica, Islas Baleares, Ceuta y Melilla; y la segunda, con las estaciones de las Islas Canarias. Ambas subredes se encuentran separadas una distancia superior a 1500 Km, por lo que será necesario diferenciar esas dos zonas a la hora de realizar la selección de los telesismos que participarán en el cálculo de las funciones receptoras. Se tomarán dos centros aproximados de cada una de estas zonas, cuyas coordenadas geodésicas aproximadas serán $40^\circ 12' N$, $3^\circ 24' W$ para la primera zona, y $25^\circ 31' N$, $17^\circ 45' W$ para la segunda.

Por último, sólo se tomarán telesismos con magnitud momento (M_w) superior a 6,5. Así se reducirá el número de sismogramas que presenten excesivo ruido o en los que sea complicado picar la llegada de la onda P directa con facilidad.

Una vez establecidos estos criterios de selección, ya se puede proceder a la obtención de la información del USGS.

Existe un centro dentro de este servicio que recibe el nombre de *Centro de Información Nacional de Terremotos* (National Earthquake Information Center, NEIC) y que entre otros tiene como objetivo determinar de manera rápida la ubicación y magnitud de todos los terremotos ocurridos en el mundo y difundir, inmediatamente, esta información. Además, el NEIC cuenta con una amplia base de datos de telesismos y sus parámetros, de la que se obtendrá la información a través de internet.



Para acceder a ella, se emplea la página web del NEIC (Figura 3.2.), <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>, y se selecciona *Búsqueda en el Catálogo de terremotos* (Earthquake Catalog Search).

USGS
science for a changing world

Earthquake Hazards Program

Home About Us Contact Us Search

EARTHQUAKES HAZARDS DATA & PRODUCTS LEARN MONITORING RESEARCH

NEIC Home

Routine U.S. Mining Seismicity

Tour Information

Who We Are

Contact Us

National Earthquake Information Center - NEIC

The mission of the National Earthquake Information Center (NEIC) is to determine rapidly the location and size of all destructive earthquakes worldwide and to immediately disseminate this information to concerned national and international agencies, scientists, and the general public. The NEIC compiles and maintains an extensive, global seismic database on earthquake parameters and their effects that serves as a solid foundation for basic and applied earth science research.

Earthquake Data Available from the NEIC

- [Current Worldwide Earthquake List](#)
- [Old Earthquake List](#)
- [Earthquake Catalog Search](#)
- [Earthquake Summary Posters](#)
- [International Registry of Seismograph Stations](#)
- [Large Earthquakes This Year](#)
- [Moment Tensor & Broadband Source Parameter Search](#)
- [Seismicity Maps of the World](#)
- [Today in Earthquake History](#)
- [Earthquake Lists & Maps](#)

- [Historic Worldwide Earthquakes](#)
- [Historic United States Earthquakes](#)

Share this page: [Facebook](#) [Twitter](#) [Google](#) [Email](#)

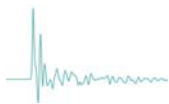
EARTHQUAKES	HAZARDS	DATA & PRODUCTS	LEARN	MONITORING	RESEARCH
quake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/		Data	EQ Topics for Education	NEIC	Projects

Figura 3.2. Página web del NEIC.

Automáticamente se abrirá una ventana (Figura 3.3.) en la que se tiene la posibilidad de realizar la explotación del catálogo sísmico mediante la introducción de una serie de campos básicos:

- Fechas y horas del intervalo deseado.
- Intervalo de Magnitud.
- Región geográfica.

También es posible seleccionar el tipo de archivo de salida en el que se desea que aparezca la información, así como el orden en el que se prefiere que aparezcan los datos.



Basic Search Options	Advanced Search Options	Output Options
DATE & TIME Start (UTC): 2003-01-01 00:00:00 End (UTC): 2013-12-31 23:59:59	DEPTH (KM) Minimum: <input type="text"/> Maximum: <input type="text"/>	FORMAT <input type="radio"/> Map & List <input checked="" type="radio"/> CSV <input type="radio"/> KML <input type="radio"/> QuakeML <input type="radio"/> GeoJSON
MAGNITUDE Minimum: 6.5 Maximum: <input type="text"/>	AZIMUTHAL GAP Minimum: <input type="text"/> Maximum: <input type="text"/>	ORDER BY <input checked="" type="radio"/> Time - Newest First <input type="radio"/> Time - Oldest First <input type="radio"/> Magnitude - Largest First <input type="radio"/> Magnitude - Smallest First
GEOGRAPHIC REGION Currently searching entire world Rectangle Decimal degree coordinates. North must be greater than South. East must be greater than West. <div style="text-align: center;"><div>North</div><div>West <input type="text"/> East <input type="text"/></div><div>South <input type="text"/></div></div> Circle Center Latitude: <input type="text"/> Center Longitude: <input type="text"/> Inside Radius (km): <input type="text"/> Outside Radius (km): <input type="text"/>	REVIEW STATUS <input checked="" type="radio"/> Any <input type="radio"/> Automatic <input type="radio"/> Reviewed + EVENT TYPE + IMPACT (PAGER, SHAKEMAP, DYFI) + CATALOG + CONTRIBUTOR + PRODUCT TYPE	LIMIT RESULTS Number of Events: <input type="text"/> Offset: <input type="text"/>

Figura 3.3. Explotación del catálogo sísmico de NEIC a través de la página web del USGS.

A pesar de la gran cantidad de opciones que brinda la búsqueda del NEIC, únicamente se rellenarán los campos de fecha y hora inicial y final; y magnitud mínima. La selección por distancia al epicentro, se realizará en una hoja de cálculo a partir de la información obtenida, ya que no se puede introducir este criterio en la búsqueda del NEIC.

Dentro de los posibles formatos de archivo de salida, se ha elegido el tipo CSV, ya que se trata de un tipo de documento en formato abierto sencillo, ASCII en texto plano, para poder representar posteriormente los datos en forma de tabla.

La información presente en este archivo (Figura 3.4.) aparece distribuida en columnas con la información referente a:

- Fecha y hora del evento.
- Coordenadas geográficas del epicentro.
- Profundidad del hipocentro.
- Magnitud.
- Tipo de magnitud.
- NbStation. Nº de estaciones utilizadas en el cálculo hipocentral.
- Gap. Ángulo máximo entre estaciones adyacentes.



- RMS Error medio cuadrático
- Fuente de información de la localización
- EventID. Identificador del evento
- Version

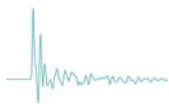
CSV PENINSULA - Bloc de notas													
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda									
DateTime	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	MagType	NbStations	Gap	Distance	RMS	Source	EventID	Version	
2013-02-06T00:07:22.300+00:00	-10.865	165.248	12.6	6.0	Mw	341	29	5.4	0.58	us	usc000f1r5	1363392612532	
2013-02-06T10:33:17.400+00:00	-10.643	164.764	10.0	6.0	Mt	279	29	4.9	0.97	us	usc000f29g	1361712323224	
2013-02-06T11:53:55.200+00:00	-11.245	165.727	14.0	6.0	Mw	265	72	6.0	0.82	us	usc000f2ap	1363392614985	
2013-02-07T00:30:10.700+00:00	-11.658	164.940	8.0	6.0	Mw	343	25	5.4	0.77	us	usc000f2u1	1363392615919	
2010-01-05T13:11:42.820+00:00	-9.050	157.892	35.0	6.0	mwc	117	18	1.21	pde	pde20100105131142820_35	1363398490028		
2010-01-12T22:00:41.490+00:00	-18.387	-72.784	10.0	6.0	mwc	196	24	0.84	pde	pde20100112220041490_10	1363398493195		
2010-02-06T04:44:58.400+00:00	-46.836	152.731	30.0	6.0	mwc	339	23	0.92	pde	pde20100206044458400_30	1363398511213		
2010-02-22T07:00:51.320+00:00	-23.626	-176.036	15.0	6.0	mwc	251	53	0.81	pde	pde20100222070051320_15	1363398520788		
2010-02-27T06:51:17.650+00:00	-31.663	-69.141	39.8	6.0	mb	118	53	0.69	pde	pde20100227065117650_39	1363398524046		
2010-02-27T07:12:28.450+00:00	-33.878	-71.943	35.0	6.0	mb	291	30	1.02	pde	pde20100227071228450_35	1363398524102		
2010-02-27T07:37:17.960+00:00	-36.869	-72.673	35.0	6.0	mb	319	34	0.86	pde	pde20100227073717960_35	1363398524339		
2010-02-27T10:30:36.400+00:00	-33.281	-71.955	35.0	6.0	mb	213	33	0.71	pde	pde20100227103036400_35	1363398525269		
2010-02-27T12:12:34.910+00:00	-34.700	-71.827	35.0	6.0	mb	310	34	0.71	pde	pde2010022721234910_35	1363398528568		
2010-03-04T01:59:48.670+00:00	-33.216	-72.125	24.2	6.0	mwc	302	77	0.86	pde	pde20100304015948670_24	1363398536649		
2010-03-11T15:06:02.130+00:00	-34.470	-72.004	31.5	6.0	mb	316	34	1.04	pde	pde20100311150602130_31	1363398541271		
2010-03-25T05:29:24.720+00:00	-13.827	120.071	16.0	6.0	mwc	260	21	0.88	pde	pde20100325052924720_16	1363398548600		
2010-03-28T21:38:28.000+00:00	-35.387	-73.385	29.9	6.0	mwb	259	53	0.81	pde	pde20100328213828000_29	1363398549672		
2010-04-02T22:58:07.560+00:00	-36.227	-72.878	24.0	6.0	mwc	353	34	0.81	pde	pde20100402225807560_24	1363398553655		
2010-04-07T14:33:01.930+00:00	-3.760	141.943	23.0	6.0	mwc	231	33	1.01	pde	pde20100407143301930_23	1363398557452		
2010-04-10T16:54:24.250+00:00	-20.114	-176.223	27.3	6.0	mwb	354	22	0.75	pde	pde20100410165424250_273	1363398559258		
2010-04-23T10:03:06.180+00:00	-37.529	-72.969	32.0	6.0	mwc	237	36	0.86	pde	pde20100423100306180_32	1363398564354		
2010-04-24T07:41:00.410+00:00	-1.912	128.122	27.0	6.0	mwc	244	47	1.01	pde	pde20100424074100410_27	1363398564562		
2010-05-19T04:15:43.230+00:00	-5.083	-77.541	132.0	6.0	mwb	502	17	0.75	pde	pde20100519041543230_132	1363398576551		
2010-05-19T10:30:10.400+00:00	-54.800	-135.252	10.0	6.0	mwc	90	35	1.28	pde	pde20100519103010400_10	1363398576690		
2010-05-19T10:51:03.080+00:00	-54.843	-135.398	10.0	6.0	mwc	97	38	1.44	pde	pde20100519105103080_10	1363398576753		
2010-05-31T10:16:00.230+00:00	6.948	124.025	20.0	6.0	mwc	234	19	1.06	pde	pde20100531101600230_20	1363398580520		
2010-06-01T03:26:15.760+00:00	9.331	-84.206	18.0	6.0	mwc	370	45	1.05	pde	pde20100601032615760_18	1363398582587		
2010-06-09T23:23:17.350+00:00	-18.597	169.485	12.0	6.0	mwb	171	78	1.02	pde	pde20100609232317350_12	1363398586275		
2010-06-17T13:06:46.590+00:00	-33.168	179.719	170.4	6.0	mwb	299	17	1.17	pde	pde20100617130646590_170	1363398589438		
2010-07-18T19:48:04.540+00:00	52.815	-169.719	10.0	6.0	mwb	474	49	1.00	pde	pde20100718194804540_10	1363398603187		
2010-08-04T04:46:20.380+00:00	-26.916	-177.245	19.0	6.0	mwc	277	60	0.94	pde	pde20100804044620380_19	1363398617041		

Figura 3.4. Archivo ASCII descargado desde el USGS.

Para este trabajo no será necesaria toda esta información, únicamente se utilizará la referente a la fecha y hora del evento, coordenadas del epicentro y magnitud del sismo. No se tomará la información de la distancia, ya que la columna que contiene esta información, aparece vacía casi en la totalidad del catálogo. Por ello, la distancia epicentral hasta el centro teórico de cada zona de estudio se calculará sobre una tierra esférica a continuación, empleando las coordenadas geográficas de epicentros y estaciones.

Por otro lado, tampoco se incorporará el identificador del evento, ya que el NEIC proporciona un identificador propio del USGS y el IGN tiene sus propios identificadores para los terremotos, diferentes a los proporcionados.

Una vez obtenida esta información del NEIC, debemos realizar la selección de aquellos terremotos que cumplan los requisitos de distancia descritos a principio del punto. Para ello, convertiremos el archivo .csv en un archivo .xls, que permita poder abrirlo con Microsoft Excel (Figura 3.5.). La información no sufre ninguna variación, ni en forma, ni en contenido, pero de este modo tenemos la información mejor estructurada y con la posibilidad de operar por columnas, filas o celdas.



DateTime	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	MagType	NbStations	Gap	Distance	RMS	Source	EventID	Version
2013-02-06T00:07:22,300+00:00	-10,865	165,248	12,6		6 Mw	341	29	5,4	0,6	usc000f1r5	usc000f1r5	1,363E+12
2013-02-06T10:33:17,400+00:00	-10,643	164,764	10		6 Mt	279	29	4,9	1	usc000f29g	usc000f29g	1,362E+12
2013-02-06T11:53:55,200+00:00	-11,245	165,727	14		6 Mw	265	72	6	0,8	usc000f2ap	usc000f2ap	1,363E+12
2013-02-07T00:30:10,700+00:00	-11,658	164,94	8		6 Mw	343	25	5,4	0,8	usc000f2ul	usc000f2ul	1,363E+12
2010-01-05T13:11:42,820+00:00	-9,05	157,892	35		6 mwc	117	18		1,2	pde2010010	pde2010010	1,363E+12
2010-01-12T22:00:41,490+00:00	18,387	-72,784	10		6 mwc	196	24		0,8	pde2010011	pde2010011	1,363E+12
2010-02-06T04:44:58,400+00:00	46,836	152,731	30		6 mwc	339	23		0,9	pde2010020	pde2010020	1,363E+12
2010-02-22T07:00:51,320+00:00	-23,626	-176,036	15		6 mwc	251	53		0,8	pde2010022	pde2010022	1,363E+12
2010-02-27T06:51:17,650+00:00	-31,663	-69,141	39,8		6 mb	118	53		0,7	pde2010022	pde2010022	1,363E+12
2010-02-27T07:12:28,450+00:00	-33,878	-71,943	35		6 mb	291	30		1	pde2010022	pde2010022	1,363E+12
2010-02-27T07:37:17,960+00:00	-36,869	-72,673	35		6 mb	319	34		0,9	pde2010022	pde2010022	1,363E+12
2010-02-27T10:30:36,400+00:00	-33,281	-71,955	35		6 mb	213	33			pde2010022	pde2010022	1,363E+12
2010-02-27T23:12:34,910+00:00	-34,7	-71,827	35		6 mb	310	34		0,7	pde2010022	pde2010022	1,363E+12
2010-03-04T01:59:48,670+00:00	-33,216	-72,125	24,2		6 mwc	302	77		0,9	pde2010030	pde2010030	1,363E+12
2010-03-11T15:06:02,130+00:00	-34,47	-72,004	31,5		6 mb	316	34		1	pde2010031	pde2010031	1,363E+12
2010-03-25T05:29:24,720+00:00	13,827	120,071	16		6 mwc	260	21		0,9	pde2010032	pde2010032	1,363E+12
2010-03-28T21:38:28,000+00:00	-35,387	-73,385	29,9		6 mwb	259	53			pde2010032	pde2010032	1,363E+12
2010-04-02T22:58:07,560+00:00	-36,227	-72,878	24		6 mwc	353	34		0,8	pde2010040	pde2010040	1,363E+12
2010-04-07T14:33:01,930+00:00	-3,76	141,943	23		6 mwc	231	33		1	pde2010040	pde2010040	1,363E+12
2010-04-10T16:54:24,250+00:00	-20,114	-176,223	273,2		6 mwb	354	22		0,8	pde2010041	pde2010041	1,363E+12
2010-04-23T10:03:06,180+00:00	-37,529	-72,969	32		6 mwc	237	36		0,9	pde2010042	pde2010042	1,363E+12
2010-04-24T07:41:00,410+00:00	-1,912	128,122	27		6 mwc	244	47		1	pde2010042	pde2010042	1,363E+12
2010-05-19T04:15:43,230+00:00	-5,083	-77,541	132		6 mwb	502	17		0,8	pde2010051	pde2010051	1,363E+12
2010-05-19T10:30:10,400+00:00	-54,8	-135,252	10		6 mwc	90	35		1,3	pde2010051	pde2010051	1,363E+12
2010-05-19T10:51:03,080+00:00	-54,843	-135,398	10		6 mwc	97	38		1,4	pde2010051	pde2010051	1,363E+12
2010-05-31T10:16:00,230+00:00	6,948	124,025	20		6 mwc	234	19		1,1	pde2010053	pde2010053	1,363E+12
2010-06-01T03:26:15,760+00:00	9,331	-84,206	18		6 mwc	370	45		1,1	pde2010060	pde2010060	1,363E+12
2010-06-09T23:23:17,350+00:00	-18,597	169,485	12		6 mwb	171	78		1	pde2010060	pde2010060	1,363E+12
2010-06-17T13:06:46,590+00:00	-33,168	179,719	170,4		6 mwb	299	17		1,2	pde2010061	pde2010061	1,363E+12
2010-07-18T19:48:04,540+00:00	52,815	-169,719	10		6 mwb	474	49		1	pde2010071	pde2010071	1,363E+12

Figura 3.5. Hoja de Cálculo con la información clasificada por columnas.

En primer lugar, y como se ha comentado anteriormente, se va a calcular la distancia del centro aproximado de cada zona al epicentro de cada telesismo, empleando la siguiente fórmula:

$$Dist(A,B) = R \arccos [\sin(\varphi_A) \sin(\varphi_B) + \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_B) \cos(\lambda_A - \lambda_B)]$$

3.1.

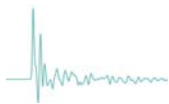
dónde A es el centro aproximado de la zona de estudio, B es el epicentro del telesismo y R es el valor del radio para un modelo de Tierra esférica, 6372 Km.

Se aplicará a éste catálogo los límites de distancia, obteniendo los telesismos contenidos en un área circular limitada por los radios 30° a 95° (respectivamente, ≈3340 Km a ≈10575 Km) para cada una de las zonas.

Una vez realizadas estas operaciones, ya se dispone de dos catálogos de trabajo con la relación de telesismos a utilizar, uno para las estaciones de la Península y otro para Canarias.

3.2. Segmentación

Elegidos los telesismos aptos para el proyecto, se deberán obtener los sismogramas de tres componentes que registraron las estaciones de banda ancha para estos eventos. No es necesario disponer de sismogramas de mucha duración, de hecho, únicamente se tomaran registros de doce minutos; dos minutos antes de la llegada de la onda P directa a la estación más próxima y los diez minutos posteriores a dicha llegada.



Para ello, se elaborará un archivo (Figura 3.6.) que nos permita realizar la segmentación de los sismogramas de cada telesismo, registrados en formato digital por cada una de las estaciones de la Red Sísmica del IGN. Esta segmentación se llevará a cabo a través de un ordenador que se encuentra en el departamento de sismología del IGN situado en el Real Observatorio de Madrid, dotado de sistema operativo Linux, en el que se volcará un script ejecutable, el cual trabaja contra la base de datos del Instituto Geográfico Nacional que reside en una máquina en la sede del IGN en la calle General Ibáñez de Ibero y que contiene almacenado el registro continuo de todas las estaciones sísmicas desde 2003.

Para poder realizar este archivo, se debe completar la información de la que ya se dispone con información de la base de datos del IGN. En concreto, es necesario conocer la hora en la que se registró en la estación más próxima al epicentro, la onda P directa, ya que la hora que facilita el NEIC es la hora origen del telesismo. Por otro lado, el identificador proporcionado por el NEIC no es compatible, será necesario conocer el identificador propio con el que el IGN ha clasificado el evento.

Una vez se disponga de toda esta información se puede crear el archivo. Éste debe ser un script ejecutable (.sh) en Linux, y tendrá el siguiente formato:

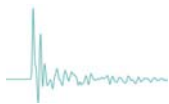
segmenta	2003-01-22	02:18:42	18.9	-104.06	24	P0361799
segmenta	2003-02-19	03:44:53	53.6	-164.73	19	P0365512
segmenta	2003-03-17	16:48:56	51.28	177.93	28	P0370097
segmenta	2003-05-14	06:10:58	18.31	-58.6	32	P0381231
segmenta	2003-05-26	09:37:36	38.86	141.5	68	P0386054
segmenta	2003-06-15	19:37:10	51.56	176.85	20	P0392084
segmenta	2003-06-16	22:19:56	55.46	159.93	180	P0392253
segmenta	2003-06-20	06:29:15	-7.64	-71.67	553	P0392916
segmenta	2003-06-20	13:42:38	-30.65	-71.53	32	P0393149
segmenta	2003-06-23	12:25:11	51.46	176.73	20	P0393757

Figura 3.6. Formato archivo .sh de la segmentación.

La información, que aparecerá distribuida en columnas, será la siguiente:

- Script de Linux que realiza la segmentación.
- Fecha del evento
- Hora de registro de la onda P directa por la estación más próxima.
- Latitud del epicentro
- Longitud del epicentro
- Profundidad del hipocentro
- Identificador EVID

Al ejecutar el script se realizará la segmentación. El script *segmenta* crea una carpeta denominada DATOS_FR y, en ella, almacena todos los “segmentos” de cada



uno de los sismogramas en archivos binarios independientes bajo el formato .seed (Standard for the Exchange of Earthquake Data, *Federation of Digital Seismographic Networks*, 2012). Cada fichero contendrá los registros de todas las estaciones de la Red para un mismo evento, es decir, se generarán y almacenarán tantos archivos como telesismos formen parte de la segmentación. Este formato .seed es el empleado por la FDSN (International Federation of Digital Seismograph Networks) e IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) para el intercambio de datos de series de tiempo sismológicas y metadatos relacionados. Este formato fue diseñado a finales de los ochenta, y tras haber sido mejorado y perfeccionado, sigue siendo el formato generalizado para este tipo de trabajos.

3.3. Revisión de telesismos

Antes de comenzar a trabajar en el cálculo de la función receptora, será recomendable realizar una primera comprobación de los segmentos de los sismogramas. Para ello, visualizaremos los sismogramas con el software libre SeisGram2K (Lomax, 1991), un software interactivo para el análisis y la visualización de sismogramas. En él aparecerán, como muestra la Figura 3.7., las tres componentes del sismograma para cada fichero .seed y cada estación.

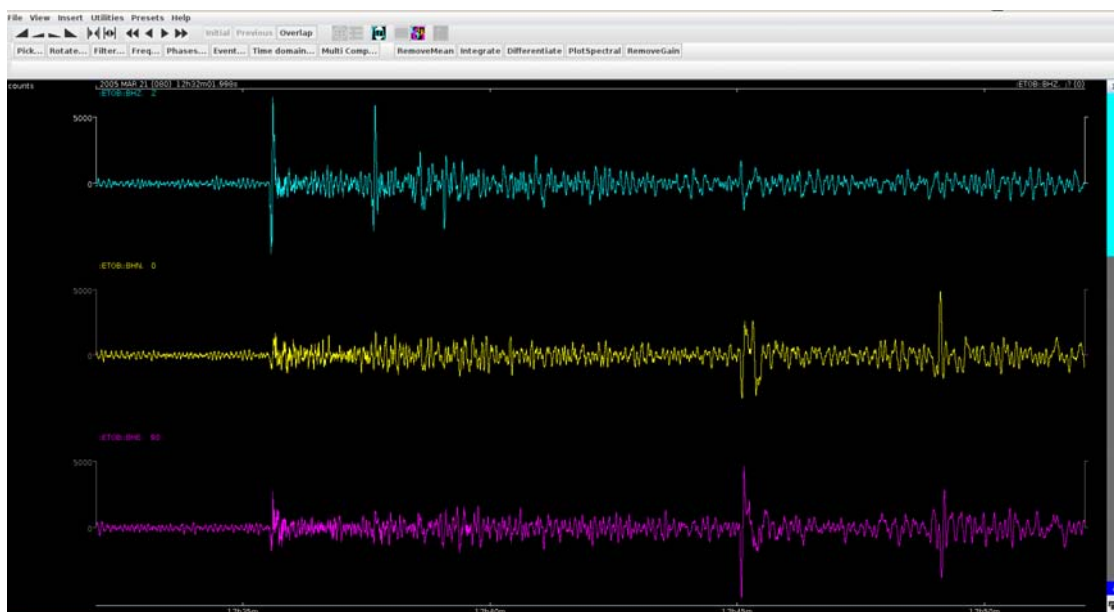
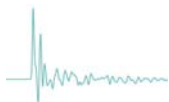


Figura 3.7. Vista en SeisGram2K (Lomax, 1991) del sismograma de tres componentes del telesismo P0554629 (Santiago del Estero, Argentina), registrado por la estación de Tobarra (ETOB, Albacete).

Se irán observando todos y cada uno de los sismogramas de cada telesismo con la finalidad de detectar posibles sismogramas defectuosos y anomalías en los mismos. Esto permitirá eliminar del cálculo aquellos telesismos en que se carezca de segmentos con señal sísmica suficiente. En las Figuras 3.8. y 3.9. aparecen algunos ejemplos de sismogramas defectuosos o con excesivo ruido.



En el sismograma de la Figura 3.8. se aprecian cortes en la transmisión de la señal que invalidan su participación en este estudio.

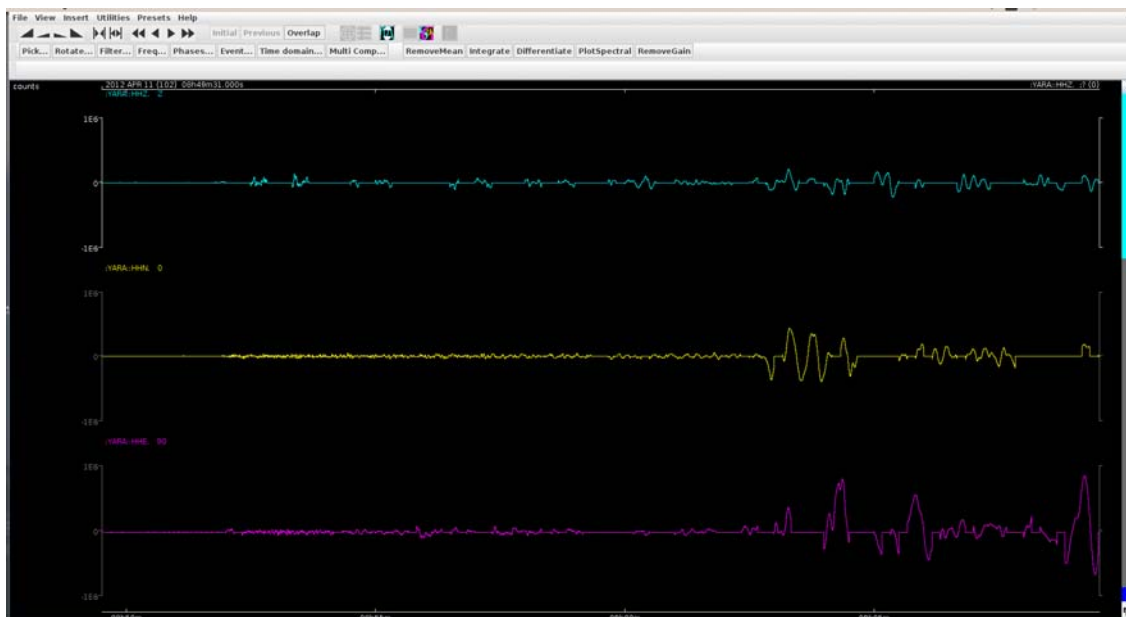


Figura 3.8. Sismograma con registro defectuoso del telesismo P0554629, registrado por la estación de Arangoiti (YARA, Navarra).

También serán desechados aquellos sismogramas en los que no se hayan registrado las tres componentes, ya que éstas son necesarias para el cálculo de la función receptora. Este es el caso que muestra la Figura 3.9., en el que la estación EIBI, únicamente ha registrado la componente Z del telesismo.

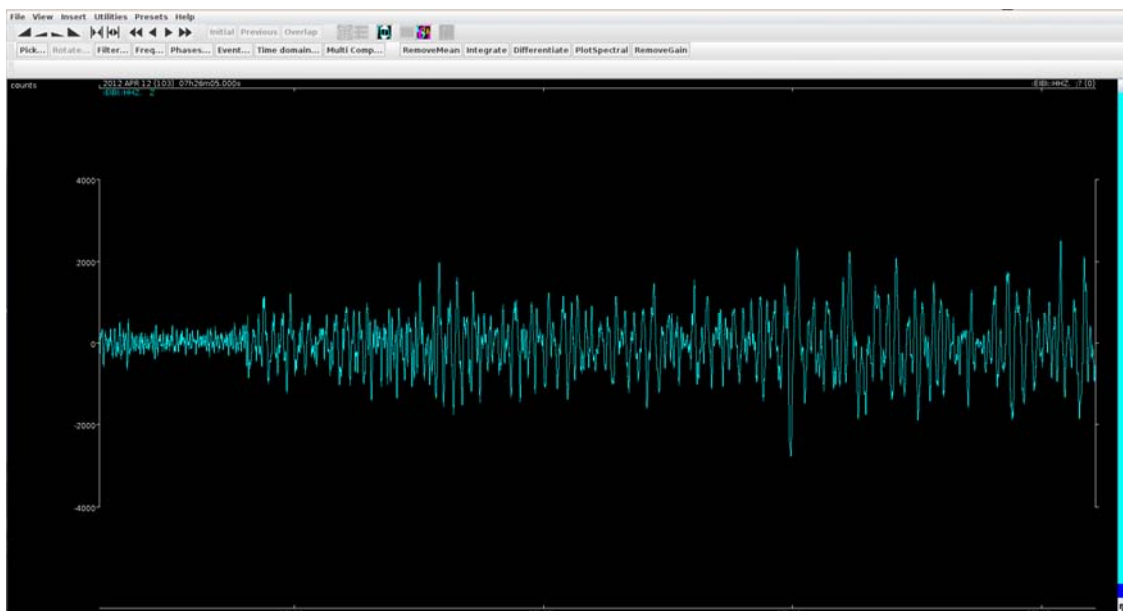
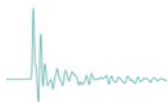


Figura 3.9. Sismograma con registro defectuoso del telesismo P0554629, registrado por la estación de Ibiza (EIBI, Ibiza).



En algunos casos, a pesar de que la calidad aparente de los sismogramas no sea la deseada, no serán desechados, ya que cabe la posibilidad de mejorar la señal en el siguiente proceso, tras haber sido aplicados los filtros adecuados, que eliminan el ruido. Se aplicará un filtro de Paso Banda entre dos frecuencias (0,05 - 0,5 Hz). En la Figura 3.10 se muestra el efecto que dicho filtro tiene sobre el sismograma apreciándose una gran mejoría en la señal.

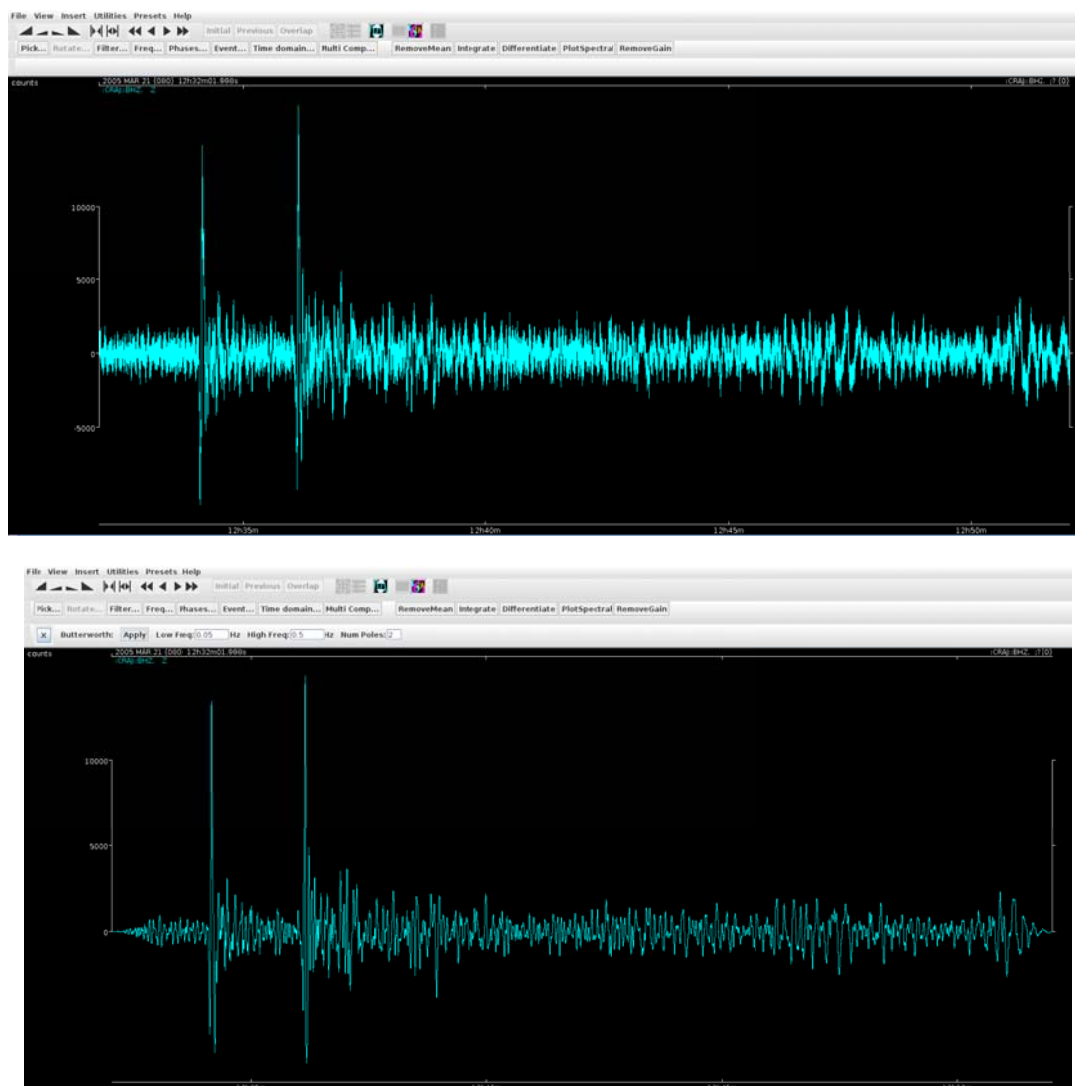
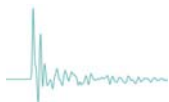


Figura 3.10. Visualización de la componente Z del sismograma registrado por la estación CRAJ (Montaña Rajada, Tenerife) del telesismo P0554629, antes y después de aplicar un filtro de Paso Banda entre frecuencias baja (0,05 Hz) y alta (0,5 Hz).

Este proceso permitirá eliminar terremotos completos, en el caso de que los sismogramas registrados en todas las estaciones sean de mala calidad, además de comprobar si en la segmentación se ha considerado un intervalo temporal que recoja la señal completa del telesismo.



3.4. Cálculo de la función receptora

Llegados a este punto, se llevará a cabo la parte sobre la que se centra este proyecto: el cálculo de la función receptora en cada una de las estaciones con el software RFTN96.

RFTN96 (Herrmann y Ammon, 2002) forma parte de un conjunto de programas desarrollados en el departamento de Ciencias de la Tierra y de la Atmósfera de la Universidad de San Luis, Misuri, y más concretamente, por el Dr. David R. Russell y el Dr. Rober B Hermann.

Este conjunto de herramientas recibe el nombre de “Computer Programs in Seismology” y fueron creadas con el objetivo de facilitar, en la medida de lo posible, los trabajos de investigación en sismología, mediante el cálculo e interpretación de los parámetros relacionados con los sismos, la estructura interna de la Tierra...

El proceso para el cálculo con RFTN96 se comienza creando el script DO que construye la estructura necesaria del evento. Para ello, se arrancará el programa RFTN ejecutando `rftn.sh` en una ventana de comandos en nuestra máquina Linux, donde previamente se ha instalado todo el software “Computer Programs in Seismology”. Acto seguido, aparecerá una ventana (Figura 3.11.) en la que, se podrá seleccionar el parámetro deseado y, a continuación, se introducirá el valor numérico de dicho parámetro. No será necesario completar la totalidad de parámetros, en este estudio únicamente se completarán los once primeros, relativos a la fecha, hora, coordenadas, profundidad y magnitud del evento.

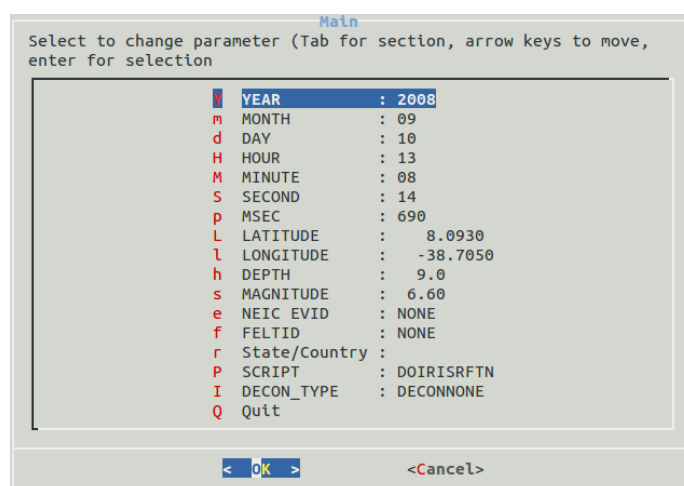
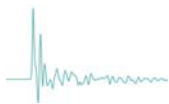


Figura 3.11. Ventana completada con la información del telesismo P0554629

Finalmente, presionando ENTER cuando la palabra *Quit* esté seleccionada, se creará el script DO (Figura 3.12.).



```
#!/bin/sh
#####
# valid regions
# REG Region          FELTID VELOCITY_MODEL
# PK  Pakistan        ous    WUS (to 69 km deep)
#####
# Command syntax:
#DOCHBREG YEAR MO DY HR MN SC MSC LAT LON DEP MAG REG NEIC FELTID STATE/COUNTRY DECON_TYPE
#####
DOIRISRFTN "2008" "09" "10" "13" "08" "14" "690" " 8.0930" " -38.7050" " 9.0" " 6.60" "RFTN" "NONE" "NONE" "" "DECONNONE"
```

Figura 3.12. Script DO, con la información referente al terremoto P0554629 introducida en la ventana inicial.

A continuación, en la ventana de comandos, se ejecuta el script DO creado para el evento a estudiar. Este comando crea subdirectorios y copia todos los archivos de procesamiento en la dirección adecuada. En este ejemplo, sea crea un directorio para un evento con el nombre 20080910130814 (fecha y hora del evento) y el siguiente contenido:

```
20080910130814 /
→20080910130814
→ DORFTN1
→ DORFTN1
→ evt.proto
→ IDODEC
→ IDODIST
→ IDOEVT
→ IDOEVTNONE
→ IDOEVTPZ
→ IDOEVTRESP
→ IDOGCARC
→ IDOMERGE
→ IDOQC
→ IDOQCTEL
→ IDORAWQC
→ IDOROT
→ IDOROTNONE
→ IDOROTPZ
→ IDOROTRESP
→ MERGE
→ MFT
→ Orig
→ Sac
→ toadd
→ html.tmp
→ VMODEL.used
```

Para continuar con el proceso, se introducirá en la carpeta Orig, el archivo .seed, correspondiente a este evento, obtenido previamente en la segmentación. Y ya,



de nuevo en la terminal, se procede a descomprimir el .seed en la propia carpeta Orig, haciendo uso del programa *rdseed 5.3.1* (IRIS, 2012), con la siguiente secuencia:

```
rdseed -f PEVID.seed -i -p -R -d -o 1
```

El comando *rdseed*, ejecuta el programa que lleva el mismo nombre, que convertirá los archivos .seed en .sac. Además, se extraen los archivos de respuesta instrumental que están incluidos en el formato .seed.

Una vez extraídos los archivos, se da comienzo a la fase final de este proceso.

En la ventana de comandos, se ejecuta el script DOFINISHRFTN, el cual realiza los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se dirige al directorio Orig y unifica las segmentaciones de los sismogramas en un único archivo. Los resultados son almacenados en el subdirectorio *MERGE*. Esta acción se lleva a cabo automáticamente mediante el script IDOMERGE.
2. A continuación, se examina la calidad de los archivos combinados en el paso anterior, con el objetivo de comprobar si algún archivo está vacío o si la calidad de la información que acompaña al mismo, no es la deseada. En ese caso no deberá ser usado para el análisis. La Figura 3.13. muestra la pantalla interactiva.

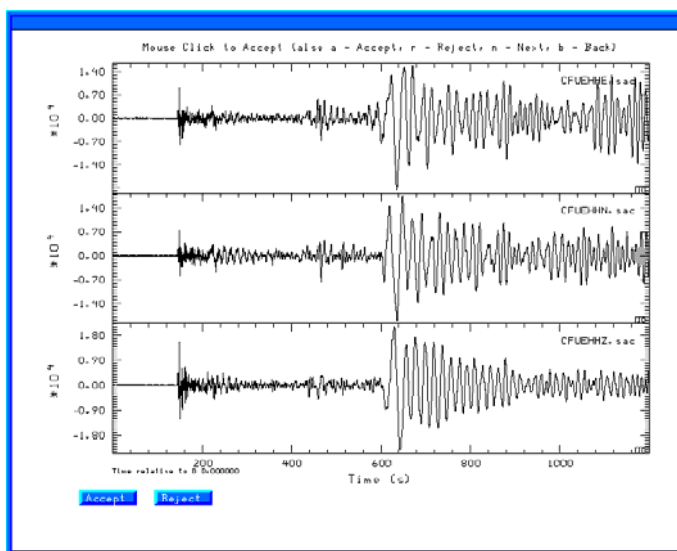
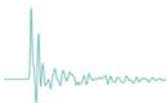


Figura 3.13. Ventana emergente, en la que se muestran las tres componentes del sismograma del telesismo P0554629 (Santiago del Estero, Argentina), registrado por la estación de Fuerteventura (CFUE).



Para aplicar el control de calidad, basta con hacer clic, usando cualquier tecla del ratón y con el puntero posado sobre cualquier parte de una de las componentes del sismograma. Habrá que repetir este proceso para las tres componentes. Al hacer clic, aparecerá una cruz (+) en rojo en la esquina inferior izquierda de la ventana de cada traza (Figura 3.14.). Cuando exista al menos una componente del sismograma con excesivo ruido o defectuosa, se deberá rechazar el registro completo. Para ello, se posicionará el cursor de la misma forma que en el caso anterior, pero no se hará clic con el ratón, sino que pulsaremos la tecla “R” en las tres componentes, automáticamente aparecerá un aspa (x) azul, también en la esquina inferior izquierda (Figura 3.15.). Si fuese necesario volver a una estación anterior se presionará la tecla “B”. Por el contrario, para pasar a la siguiente estación se empleará la tecla “N”.

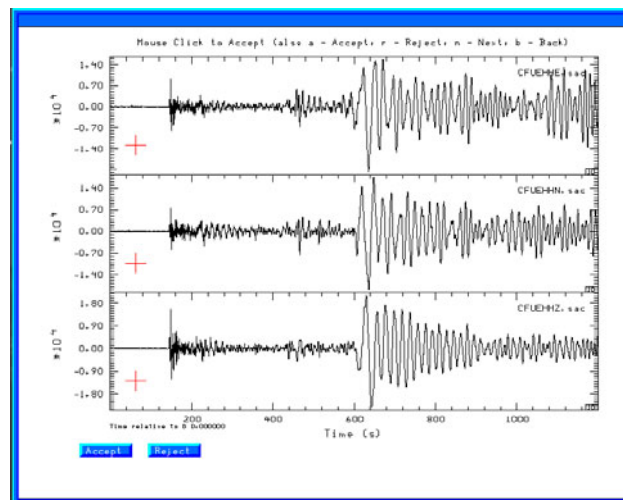


Figura 3.14. Estación calificada como válida para el cálculo, como indican las cruces rojas situadas en la esquina inferior izquierda de cada componente.

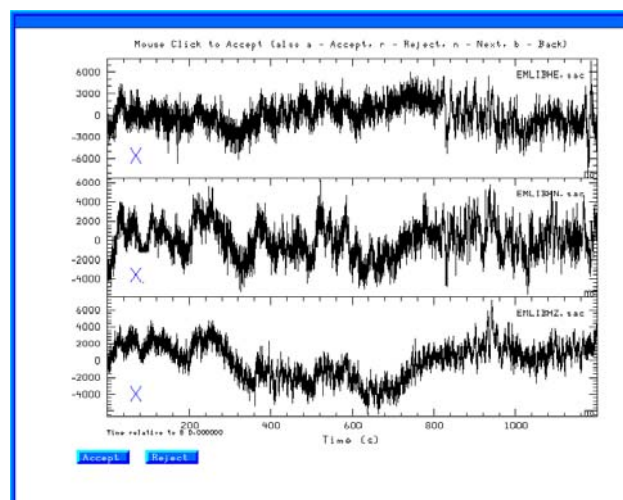


Figura 3.15. Estación rechazada para el cálculo, como indican las aspas azules situadas en la esquina inferior izquierda de cada componente.

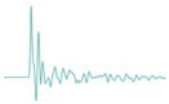


El resultado de esta operación es que solamente los archivos .sac seleccionados como válidos se copian en el subdirectorio Sac.

3. A continuación, los archivos originales de datos, son transformados utilizando los archivos de respuesta instrumental, deconvolucionando la señal con la respuesta. De esta forma se obtendrá el registro del movimiento del suelo. Para el cálculo de la función receptora para determinación de la estructura no es imprescindible la corrección instrumental si todos los eventos para cada estación están registrados con el mismo instrumento. El cálculo de esta corrección se lleva a cabo por el script IDOEVT, el cual se crea a partir de los prototipos IDOEVTNONE, IDOEVTTPZ o IDOEVTRESP. Las formas de onda resultantes se almacenan en el sub-directorio GOOD.
4. El script IDOROT (creado a partir de los prototipos IDOROTNONE, IDOROTTPZ o IDOROTRESP) realiza un giro de las componentes del sistema de referencia original (N-S, E-W, Z) y crea un nuevo sistema de referencia (vertical (Z), radial (R), transversal (T)). Las componentes resultantes de este giro se almacenan en el subdirectorio FINAL.
5. El script IDOGCARC examina los sismogramas almacenados en FINAL y copia en el subdirectorio FINALRF.QC, aquellos que pertenecen a estaciones cuyas distancias epicentrales se encuentran dentro del rango especificado en el apartado 3.1. (30° a 95°)
6. Seguidamente, el script DORFTN1 se ejecuta para el picado de la fase P directa, antes de pasar al cálculo de la función receptora.

Aparecerá una pantalla similar a la anterior para cada estación, pero con las tres componentes del sismograma en el nuevo sistema de referencia (Z, R, T) en la que de nuevo se podrá volver a rechazar registros de la misma forma que en el paso 2, pero con la diferencia que en este proceso, no es posible eliminar una única componente del sismograma. Al eliminar una componente, se elimina una estación completa.

Además, en este momento se ha de marcar en el sismograma la llegada de la onda P directa. Para ello, se ha de posicionar el cursor sobre el sismograma justo en la llegada de la onda y presionar la tecla "P" (Figura 3.16.). Si fuera necesario se podrá ampliar y disminuir el zoom con las teclas "+" y "-" para facilitar la identificación de dicho momento (Figura 3.17.). Al ser la onda P, una onda longitudinal, es más fácil de identificar la llegada de la misma en las componentes vertical y radial.



Automáticamente, aparecerá en cada una de las tres componentes, una línea vertical acompañada de la letra P en el momento marcado.

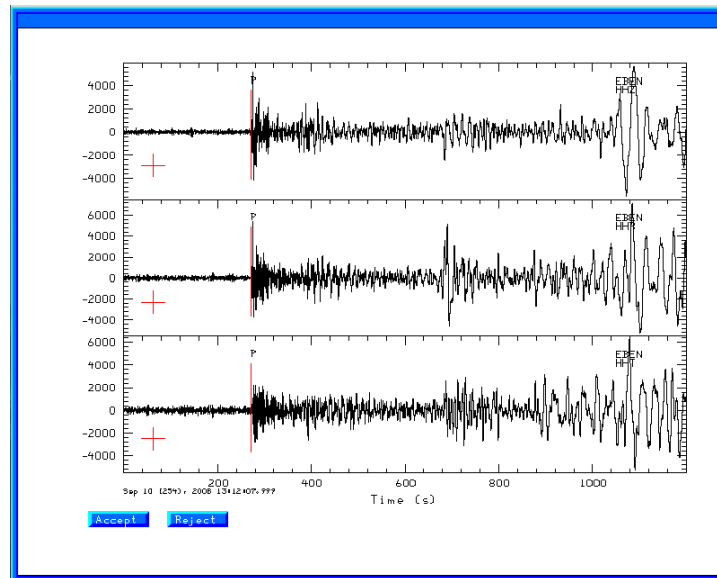


Figura 3.16. Ventana emergente, en la que se muestra las tres componentes del sismograma registrado por la estación EBEN una vez realizado el giro y con las nuevas componentes del sistema de referencia creado. Además, en la imagen, ya ha sido marcado el momento de la llegada de la onda P directa, mediante una línea vertical roja.

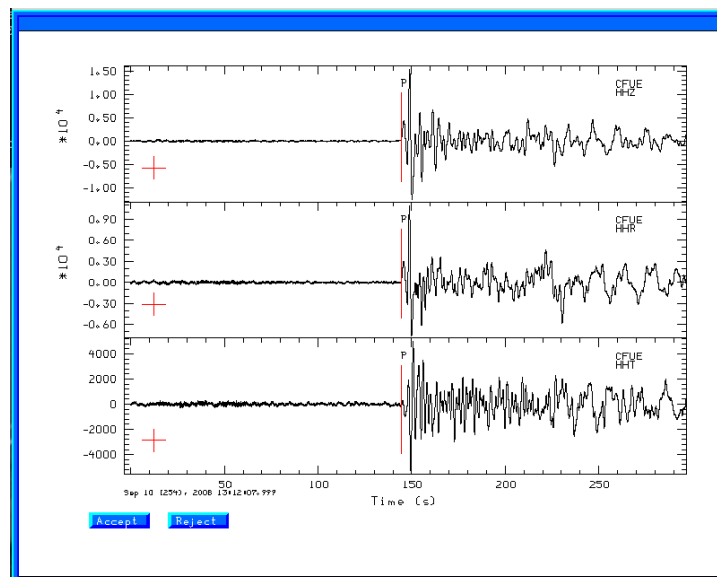
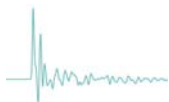


Figura 3.17. Sismograma de la Figura 3.16., con zoom aplicado en el momento de llegada de la onda P, para facilitar su picado.



Se presiona “N” para pasar al siguiente y se repetirá el proceso hasta acabar con todos los sismogramas de las estaciones del evento.

7. Finalmente el script DORFTN2 se ejecuta para calcular la función receptora, mediante el proceso de deconvolución explicado en el apartado 2.

En el interior del subdirectorío RFTN, en una carpeta denominada FUNCIONES se almacenan los archivos, en formato SAC binario, de todas las funciones receptoras, clasificadas por estaciones. Se nombran de la siguiente forma, tomando de ejemplo la *R.CFUEHHZ20133210904 (93)*:

- El primer carácter será “R” o “T”, dependiendo de si es la función receptora calculada para la componente Radial o Transversal, respectivamente.

Para un modelo de Tierra de capas planas homogéneas y sin ruido sísmico añadido, la componente “T” debe ser mínima. De no ser así, nos indica que los datos originales no eran de calidad o que la estructura bajo la estación no resulta ser del todo un modelo de capas planas.

- La siguiente parte del nombre del archivo la forman el nombre de la estación y la componente. Además les preceden el año, el día (en el calendario juliano), las horas y los minutos.
- La parte final del nombre indica el filtro gaussiano empleado, que puede tener tres valores: 0.5, 1.0 y 2.5, referidos a las desviaciones típicas de cada uno de ellos. Son filtros de paso bajo que se emplea para reducir el ruido de alta frecuencia que acompaña a la función receptora. Los más empleados son los de ganancia 1.0 y 2.5 que se corresponden con la frecuencia esquina de 0.3 y 1.0 Hz, respectivamente.

Para visualizar las gráficas pertenecientes a las funciones receptoras de las estaciones de un mismo telesismo, se utilizará el software GSAC (Generic Seismic Application Computing, *Herrmann et al.* 2004), empleado en sismología para interactuar con las trazas sísmicas y procesar grandes conjuntos de datos de manera rápida y sencilla.

Si se quiere visualizar la función receptora de manera individual de una estación en concreto (Figura 3.18.) calculada con cada filtro, se empleará este comando:

GSAC> r R.CFUE* (lee la componente radial, en este caso de la estación de Fuerteventura, CFUE)

GSAC> P (de plotter)

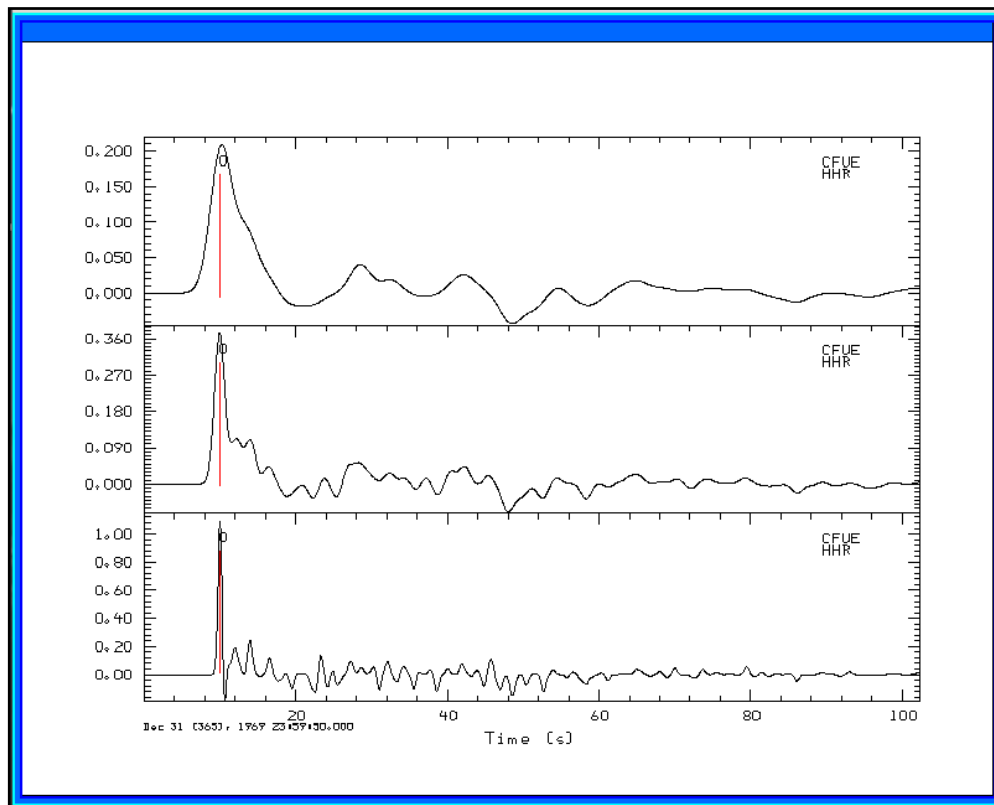


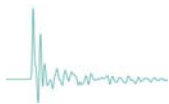
Figura 3.18. Función receptora calculada de la estación de Fuerteventura (CFUE) para el telesismo P0554629 con los filtros 0.5, 1.0 y 2.5, de arriba a abajo, respectivamente.

En esta última figura, se hace patente cuán importante es la elección de un filtro adecuado en el cálculo de la función receptora, ya que dependerá de dicha elección la correcta visualización de las fases de la misma. Un filtro inadecuado, como el 0,5 en este caso, puede suponer la desaparición de las fases de la función.

Así mismo, el programa da la posibilidad de mostrar la fiabilidad del cálculo de la función receptora de una estación para cada telesismo. En la variable de cabecera USER5, el software de cálculo de la función receptora almacena, en cada función calculada, un parámetro de ajuste que nos permite evaluar la calidad del cálculo.

Considerando que la función receptora en la componente radial es la deconvolución entre la componente vertical y la radial, el parámetro de ajuste USER 5 es el tanto por ciento de ajuste entre la componente radial filtrada con el filtro correspondiente y la señal obtenida de la convolución entre la componente vertical y la función receptora.

Si se tiene un gran número de funciones receptoras para una estación, se pueden rechazar aquellas que no superen un valor del 80% para el parámetro de ajuste.



Durante el proceso de inversión se dispondrá de otros parámetros de ajuste que permitirán rechazar aquellas funciones que no se ajusten con las funciones sintéticas obtenidas a partir del modelo de capas planas que precede a la inversión.

Para analizar el parámetro de ajuste almacenado en USER5, continuando en GSAC, se empleará el comando lh USER5. Inmediatamente mostrará los archivos, ordenados cronológicamente, de las funciones receptoras calculadas para cada filtro en cada telesismo, acompañados de su variable de ajuste expresada en tanto por ciento.

```
GSAC> lh USER5
R.CFUEHHZ20043492320.2.5 (0):
  USER5      88.71628
R.CFUEHHZ20050120840.2.5 (1):
  USER5      96.06689
R.CFUEHHZ20050472027.2.5 (2):
  USER5      75.58546
...
R.CFUEHHZ20132851311.2.5 (91):
  USER5      95.11256
R.CFUEHHZ20132921754.2.5 (92):
  USER5      86.58886
R.CFUEHHZ20133210904.2.5 (93):
  USER5      88.01937
```

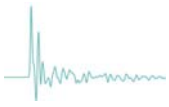
En este ejemplo aparecen los archivos de las funciones receptoras calculadas, junto con su ajuste, para el filtro 2.5 de la estación CFUE, de los primeros y los últimos telesismos registrados por dicha estación.

En el ejemplo anterior, la función el R.CFUEHHZ20050472027.2.5 posee el menor ajuste de todos ($\approx 75,6\%$).

Antes de realizar la inversión y para garantizar un buen resultado, se desecharán todas aquellas funciones receptoras cuyo ajuste esté por debajo del 80%.



CAPITULO 4: DATOS





Como ya se ha comentado anteriormente, todos los telesismos cuyos datos han sido utilizados en este estudio deben de reunir una serie de requisitos. En este capítulo se va a describir el conjunto de datos utilizados en el cálculo de la función receptora.

Se partirá de un conjunto de 216 telesismos, que debido al proceso de selección, se quedará en un total de 186 telesismos válidos para el cálculo de la función receptora.

4.1. Selección de sismos

Para llegar al cálculo de las funciones receptoras, los telesismos han sido sometidos a un proceso de selección, con el objetivo de crear un gran conjunto, lo más óptimo posible para el cálculo.

4.1.1. Criterios

Se parte de la base de un conjunto de requisitos que se han descrito ya en este documento,

- **Fecha.**

Solo telesismos ocurridos entre el año 2003 y el 2013, ambos incluido.

- **Distancia.**

La distancia epicentral al centro de la zona de estudio, no ha de ser inferior a 30° , ni superior a 95° .

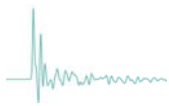
- **Magnitud.**

La magnitud de los telesismos ha de ser superior o igual a 6,5 Mw.

4.1.2. USGS

Una vez establecidos los criterios anteriores, de la página oficial del USGS, www.earthquake.usgs.gov/regional/neic, se han obtenido un total de 216 telesismos cuyos parámetros focales figuran en el *Anexo I*, y que aparecen representados en las Figuras 1.2 y 1.3.

Debido a la gran extensión de la Red Sísmica del IGN (Figura 1.1.), la distancia de separación entre unas estaciones y otras puede ser muy elevada. Por esta razón, conviene destacar que aun habiendo diferenciado dos zonas de estudio (Peninsular y Canaria), existirán telesismos dentro de la selección, que no sean válidos para toda una zona, es decir, que por encontrarse la distancia a su epicentro próxima a los límites establecidos, serán válidos para algunas estaciones de una misma zona y no lo serán para otras.



A continuación, vamos a analizar la distribución de los telesismos utilizados en cuanto a su localización y magnitud, con distribución sobre las distintas zonas de estudio.

Realizando una distribución por distancias epicentrales a cada una de las dos zonas de estudio, se observa el número de telesismos utilizados para cada zona (peninsular y canaria), como muestran las Figuras 4.1 y 4.2.

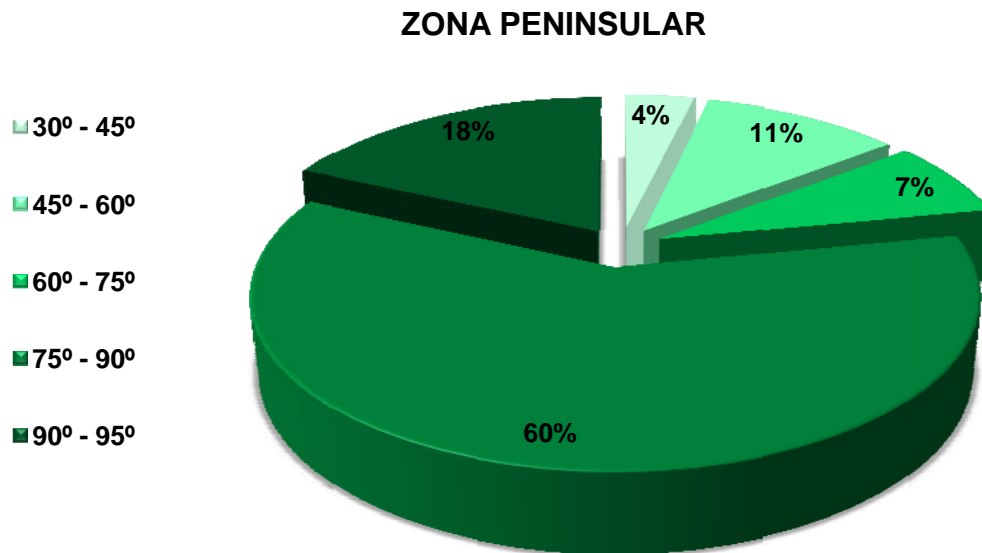


Figura 4.1. Clasificación de telesismos utilizados para el análisis de las FR de las estaciones sísmicas de la zona peninsular según distancia epicentral.

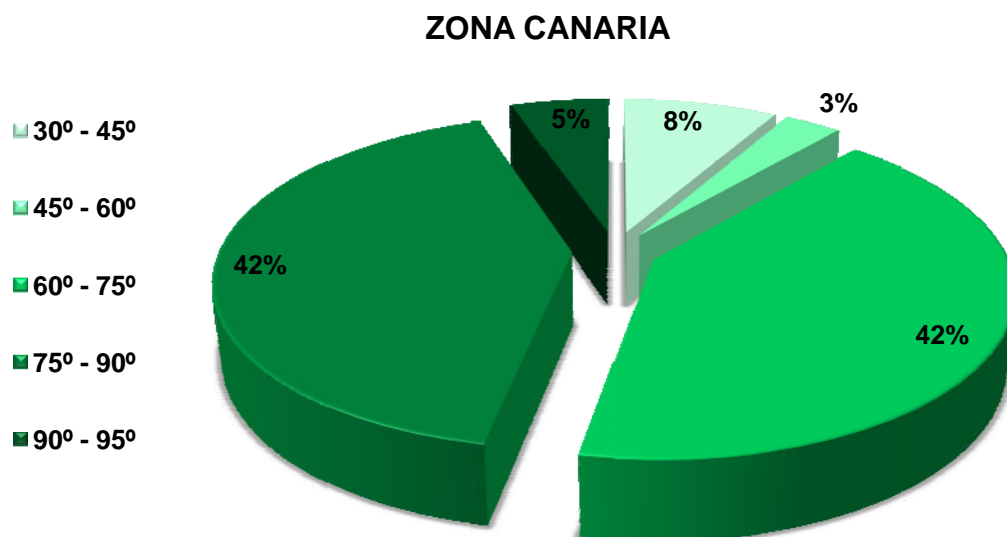
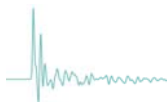


Figura 4.2. Clasificación de telesismos utilizados para el análisis de las FR de las estaciones sísmicas de la zona canaria según distancia epicentral.



La Figura 4.1. muestra como más de la mitad de los telesismos empleados para la zona peninsular poseen una distancia epicentral comprendida entre los 75° y los 90° . Si se amplía el rango en 5° más, es decir hasta los 95° , se aprecia como más de los 2/3 del total tienen una distancia comprendida en este intervalo de 20° .

Por otro lado, en la Figura 4.2., se observa que a diferencia de la zona anterior, para Canarias existen dos intervalos que poseen idéntico porcentaje, 42%. Esto se debe a que ambos cuentan con el mismo número de telesismos en su intervalo, 55.

Cambiando de parámetro (Figura 4.3.), cabe resaltar que la mayoría de estos telesismos, un 68%, poseen una magnitud comprendida entre 6,5Mw y 6,9Mw. Aumentando el intervalo, se observa que el número de telesismos cuya magnitud se encuentra en el intervalo 6,5Mw-7,9Mw, asciende hasta los 208, es decir, un 96% del total. Siendo muy escasos los superiores a 8Mw. El telesismo que posee la mayor magnitud del conjunto, es el ocurrido el 26 de diciembre de 2004 en Sumatra, Indonesia, con 9,1Mw.

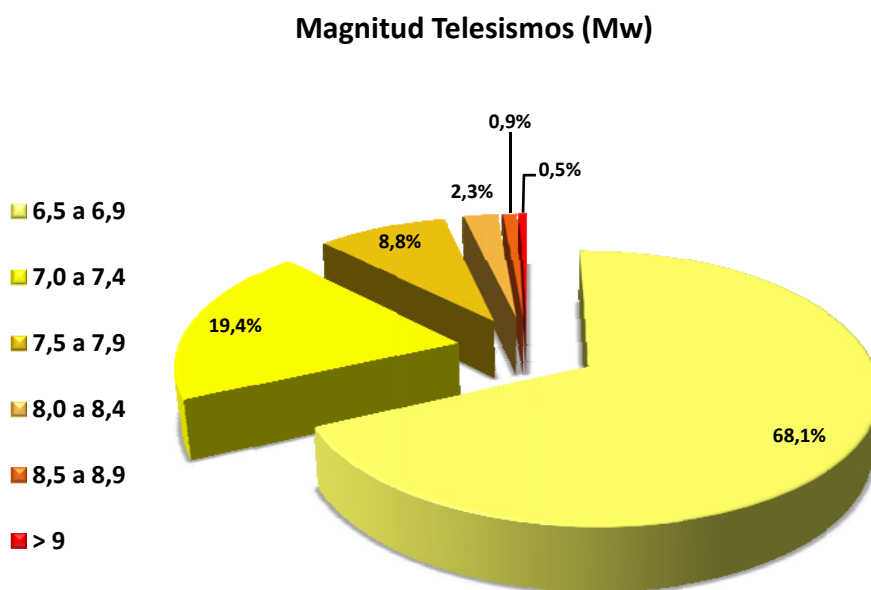


Figura 4.3. Clasificación de telesismos según magnitud (Mw).

Si se realiza una clasificación por profundidad del hipocentro (Figura 4.4.), destaca que casi la totalidad de los telesismos, el 81%, son telesismos superficiales, es decir, poseen un hipocentro situado a una profundidad inferior a 60 Km. El 11,6% son telesismos intermedios, con un hipocentro situado entre 60 y 300 Km. Y, únicamente, el 7,4% se trata de telesismos profundos, con valores superiores a 300 Km. En el conjunto, sólo tres telesismos poseen un hipocentro con una profundidad mayor de 600 Km. Además también tienen en común que tuvieron lugar en el Mar de Othotsk, al este de Siberia.

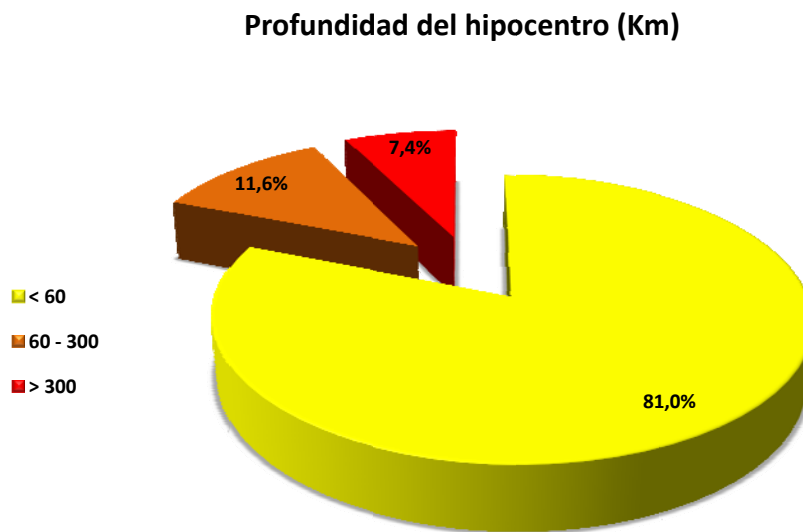
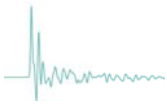


Figura 4.4. Clasificación de telesismos según la profundidad del hipocentro (Km).

Cabe destacar que las estaciones del norte peninsular fueron las primeras en registrar casi las dos terceras partes del conjunto de telesismos, esto quiere decir que estas estaciones son las más próximas a regiones de actividad sísmica utilizadas en este estudio, lo que da una ligera idea de dónde tuvieron lugar la mayoría de los terremotos.

Si se lleva a cabo un análisis de la localización de los epicentros, la gran mayoría de ellos, coinciden con las zonas de intensa actividad tectónica (Figura 4.5.).

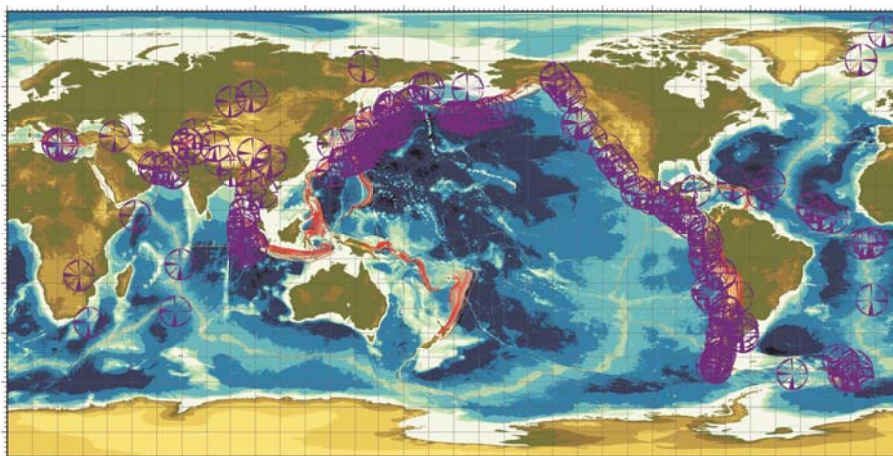
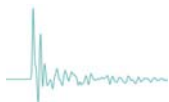


Figura 4.5. Proyección cilíndrica equidistante del mundo centrada en el Océano Pacífico que muestra la coincidencia, en su mayoría, de los epicentros de los telesismos estudiados con los límites de confrontación de las placas tectónicas



4.1.3. Segmentación

Como se ha comentado en el capítulo anterior, una vez que se ha realizado la selección de telesismos del USGS, es necesario realizar una segmentación de los sismogramas de cada uno de los telesismos, es decir, la extracción de la Base de Datos del Instituto Geográfico Nacional del registro de una ventana de duración doce minutos (2 min antes de la llegada de la onda P directa a la primera estación y 10 minutos después de la misma) para todas las estaciones.

Estos terremotos a segmentar, han sido registrados por las 55 estaciones de Banda Ancha (BB) pertenecientes a la Red Sísmica Nacional del Instituto Geográfico Nacional de España, por esta razón, conviene llevar a cabo una descripción de la misma.

4.1.3.1. Red Sísmica Nacional (RSN)

Desde el punto de vista sismológico, la Península Ibérica y su entorno constituyen una zona geográfica de gran interés; por la particular disposición y movimientos relativos de las grandes placas tectónicas (euroasiática y africana) y fallas que intervienen en la génesis de los terremotos. Aunque nuestro país tiene un riesgo bajo de que se produzcan grandes terremotos, sí tiene una actividad sísmica relevante (terremotos de magnitud inferior a 7) en algunas zonas, como Andalucía, Levante y Pirineos, que podrían provocar daños considerables.

Aunque existe instrumentación sísmica en España desde finales del siglo XIX, no es hasta el año 1985 cuando se dispuso de una verdadera red sísmica homogénea, capaz de controlar la sismicidad de la Península Ibérica. Hasta ese año, la información sísmica se nutría de los sismos históricos y de los localizados a partir de los registros de observatorios sismológicos como el observatorio de Toledo, el observatorio de Almería, el observatorio de Alicante, el observatorio Fabra en Barcelona, el observatorio del Ebro (Tortosa, Tarragona) o el observatorio de San Fernando (Cádiz), entre otros, instalaron los primeros equipos para el registro de los movimientos sísmicos y comenzaron a trabajar en el análisis e interpretación de los datos adquiridos.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN), a través de su red de observatorios geofísicos, constituía la Red Sísmica Nacional y se responsabilizaba de los trabajos de caracterización sísmica de nuestro territorio.

En la actualidad (2013), España (www.ign.es), dispone de una Red Sísmica Nacional (RSN) que, tecnológicamente, es una de las más avanzadas del mundo, y con la que se prestan los servicios nacionales de alerta sísmica y de zonificación y cartografía de la peligrosidad sísmica del territorio nacional. Esta red está constituida por la red VSAT, red Terrestre, estación de Sonseca, red portátil y red acelerógrafos. La



Red Sísmica Nacional consta de una serie de estaciones sísmicas, repartidas de la siguiente manera:

Estaciones sísmicas de transmisión digital: 43 estaciones en la Península, Ceuta y Melilla, 2 estaciones en Baleares y otras 9 en Canarias.

Estaciones sísmicas de transmisión analógica: 1 estación en la Península y 5 en las Islas Canarias.

Antena sísmica de Sonseca.

- **Red VSAT (*Very Small Aperture Terminal*)**: Son redes de comunicación por satélite que permiten el establecimiento de enlaces entre un gran número de estaciones remotas con antenas de pequeño tamaño con una estación central. Envían la información sísmica vía satélite (satélite espacial Hispasat) y de manera continuada al centro de datos. Es la subred más importante de la RSN. A día de hoy, la componen 42 estaciones distribuidas por el territorio nacional (29 en la península, 2 en Baleares, 9 en Canarias, 1 en la isla del Alborán y 1 en Ceuta, Figura 1.1)

Estas estaciones se encuentran en lugares alejados de núcleos urbanos. La mayoría se ha instalado en minas abandonadas o cuevas profundas ya que sus sensores necesitan unas condiciones de presión y temperatura muy estables y poco ruido.

La instrumentación con la que se dota a cada una de estas estaciones es la siguiente:

1 Sismómetro de banda ancha.

1 Digitizador de tres canales (de 24 bits).

1 Transceptor VSAT.

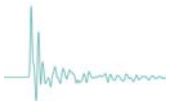
1 Receptor de tiempo GPS.

1 Unidad de gestión de comunicaciones con una memoria de más de 3 Mbyte.

1 Antena de transmisión VSAT.

Paneles solares para un consumo de 30 w de la estación.

Baterías para un funcionamiento durante 7 días.



- **Red terrestre:** Compuesta por un conjunto de 16 estaciones sísmicas que envían sus datos por medios distintos de la vía satélite, independientemente de sus características técnicas (coto periodo, banda ancha,...). Repartidas de la siguiente manera:

6 estaciones analógicas: 5 en Canarias y 1 en la Península.

8 estaciones de transmisión GPRS: 7 en la Península y 1 en Melilla.

2 estaciones de transmisión telefónica situadas en la Península.

Los emplazamientos de estas estaciones son de tipo muy variado. Generalmente se encuentran en campo libre no muy lejos de poblaciones, teniendo así un buen acceso, pero a su vez esto ocasiona que sean considerados bastante ruidosos desde el punto de vista sísmico.

También se encuentran en lugares alejados de núcleos urbanos, en almacenamientos de residuos radiactivos, en naves aisladas o cuevas, por lo que estos últimos emplazamientos en general son buenos.

La instrumentación que compone las estaciones analógicas es la siguiente:

Corto periodo componente vertical.

Telemetría: kinematics TH-11 (1canal).

Frecuencia portadora: 2040 Hz.

Ganancia: 66 dB.

Filtros: 25-0.3 Hz.

Sismómetro: Kinematics/Ranger SS1.

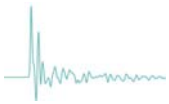
Radioenlace.

Alimentación solar.

Por otro lado, la instrumentación de las estaciones de transmisión digital de esta red ya sea GPRS o telefónica es prácticamente la misma:

1 Sismómetro de banda ancha

1 Digitizador de tres canales (de 24 bits)



1 Transceptor telefónico

1 Receptor de tiempo GPS

1 Unidad de gestión de comunicaciones.

Baterías para un funcionamiento durante 4 días.

Únicamente se diferencian en el modo de alimentación; corriente alterna 220V para las GPRS y paneles solares para un consumo de 30 w en el caso de la transmisión telefónica.

Además en el caso de las estaciones GPRS se las dota de un enlace de fibra óptica.

- **Estación de Sonseca:** En realidad es una red telesísmica establecida con el propósito de registrar y analizar señales sísmicas producidas por fuentes naturales y artificiales, y poder así realizar una vigilancia y localización de explosiones nucleares. Cuenta actualmente con 20 estaciones, siendo solo una de banda ancha.
- **Red portátil:** La RSN cuenta en la actualidad con un total de 15 estaciones portátiles utilizadas para la realización de estudios sísmicos en zonas localizadas de especial interés (crisis sísmicas, vigilancia de la actividad volcánica, entorno de embalses y construcciones especiales, estudios de microsismicidad,...). También cuenta con una estación de control móvil instalada en un vehículo especialmente adaptado para esa finalidad que puede actuar, así mismo, como una estación VSAT móvil.
- **Red de acelerógrafos:** Los registros de la aceleración del movimiento del suelo producido por terremotos, y sobre todo por los de mayor magnitud, proporcionan unos datos de gran importancia para el análisis de las fuentes sísmicas y del comportamiento del terreno en movimientos sísmicos y para la caracterización detallada de la peligrosidad sísmica, permitiendo obtener parámetros de gran interés para la ingeniería sísmica y para el diseño sismorresistente, todo ello imprescindible para la prevención de daños sísmicos en zonas donde ocurren terremotos.

Esta red, en la actualidad, la componen un total de 122 acelerógrafos digitales de alta resolución, con GPS incorporado y conexión vía MODEM con el centro de datos en la sede del IGN en Madrid, situándose los acelerógrafos en el interior de poblaciones, habitualmente en el sótano de edificios oficiales, sobre un pilar aislado de la solera.



En este proyecto, únicamente se han utilizado sismogramas registrados por estaciones de transmisión digital y de Banda Ancha (BB), imprescindibles para el cálculo de la función receptora. En concreto, se han utilizado segmentos de sismogramas de las 55 estaciones de Banda Ancha incluidas en la actualidad en la Red Sísmica Nacional, representada en la Figura 1.1.

Una vez realizada la segmentación, hemos comprobado que los fragmentos de sismogramas son válidos para el estudio, por ello, ha de realizarse un chequeo de los mismos. En primer lugar, hemos comprobado que estos archivos contengan información y no estén vacíos, para ello bastará con observar el tamaño de cada uno de ellos.

En el caso de este proyecto, después de la segmentación, los segmentos de 11 telesismos ocupaban un espacio de 0 Kb, es decir, no poseían ningún tipo de información, y por tanto, no formarán parte del estudio. Estos archivos vacíos pertenecen a los telesismos *P0361799*, *P0365512*, *P0370097*, *P0617701*, *P0619121*, *P0622527*, *P0673157*, *P0854021*, *ign2013ddiz*, *ign2013ecz* e *ign2013eeth*, en color rojo en el Anexo I. Seguramente, la falta de datos es debida a cortes en la transmisión de los datos desde las estaciones a la sede central del IGN.

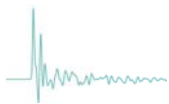
4.1.4. Revisión

Con los 205 telesismos restantes, se procede a continuar con el chequeo, visualizando con SeisGram2K (*Lomax*, 1991) los sismogramas registrados por todas las estaciones y descartando aquellos que no contengan registro de las tres componentes.

Se debe tener en cuenta que se está trabajando con sismos producidos a miles de kilómetros y, en la mayoría de los casos, de magnitudes moderadas. Si a esto, se le añade el ruido sísmico que puede acompañar a la señal, significa que en muchas ocasiones no se verá con claridad la llegada de la onda, y por tanto, será difícil de señalar de manera correcta la misma.

Es de vital importancia señalar la llegada de la onda P de manera correcta, de ello dependerá el éxito de este estudio. Una mala señalización de la llegada de la onda, implicará un mal ajuste en el cálculo posterior y, como se ha comentado en el apartado anterior, aquellos telesismos cuyo ajuste del cálculo de la función receptora no supere el mínimo establecido, no serán válidos para el estudio.

Por ello, en este proceso de visualización se han descartado los sismogramas pertenecientes a 19 telesismos, por venir acompañados de excesivo ruido o por no apreciarse de manera clara la llegada de la onda P. Estos telesismos aparecen en color morado en el Anexo I, y son *P0420403*, *P0424875*, *P0531289*, *P0531361*, *P0532194*, *P0549041*, *P0777600*, *P0815269*, *P0891439*, *P0974033*, *P0985893*, *ign2011ewwo*,



ign2012hdfy, *ign2012oojv*, *ign2012wdgg*, *ign2012wevw*, *ign2013chnk*, *ign2013lqps* e *ign2013ssol*.

Algunos ejemplos de estos sismogramas ruidosos y rechazados son los siguientes:

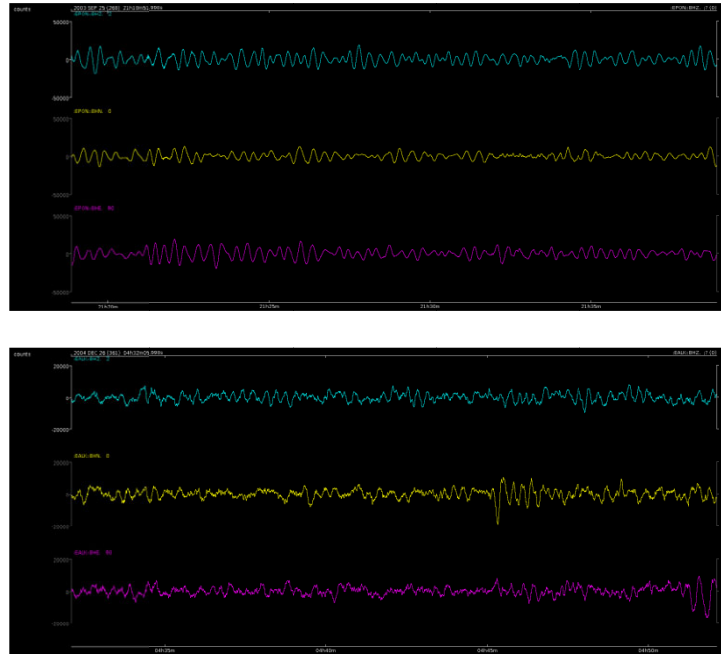


Figura 4.7. Sismogramas en los que no se aprecia llegada de onda P.
Pertenecientes a los telesismos P0420403 (arriba) y P0531289 (abajo).

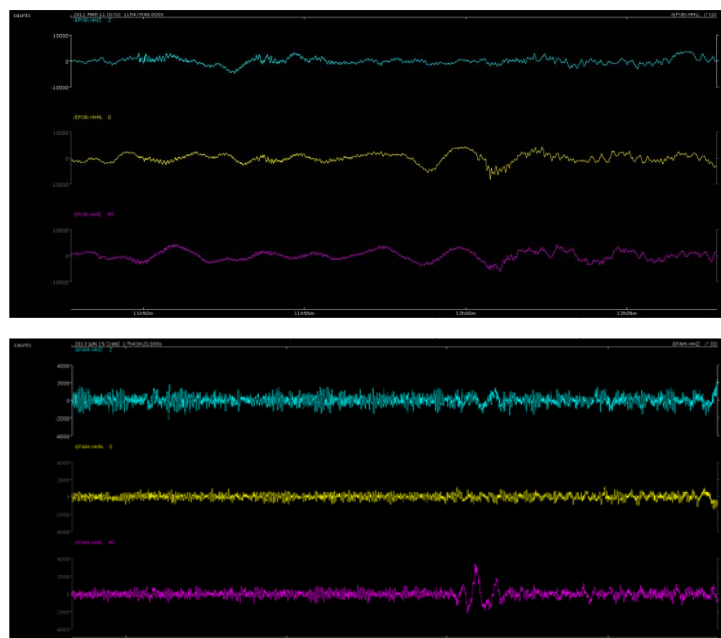


Figura 4.8. Sismogramas en los que no se percibe llegada de onda P.
Pertenecientes a los telesismos Pign2011ewwo (arriba) e Pign2013lqps (abajo).

4.2. Picado de la llegada de la onda P del Terremoto

Una vez desechados los terremotos no aptos, y los canales defectuosos, los válidos para nuestro cálculo son un total de 186 terremotos. A continuación, se ha realizado el picado de la llegada de la fase P directa a cada una de las estaciones. Algunos ejemplos de sismogramas con la señalización de la llegada son los que aparecen en la Figura 4.9.

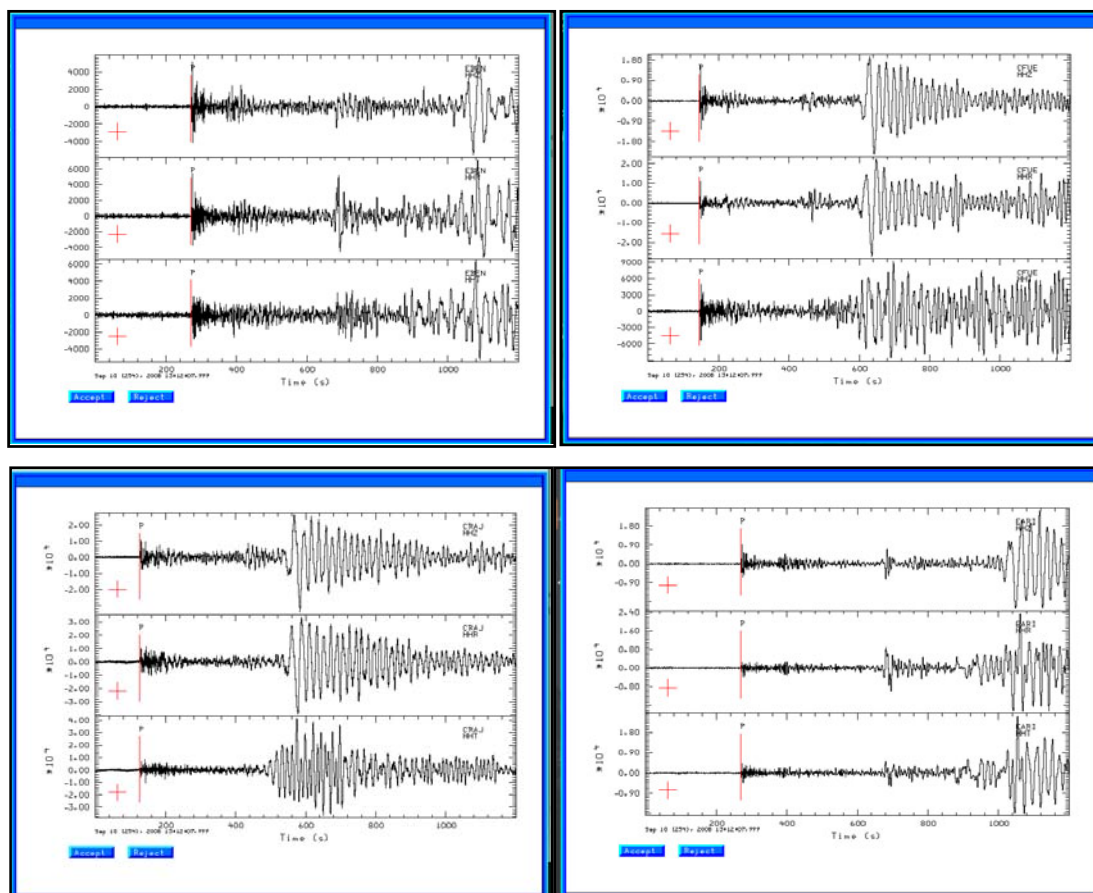


Figura 4.9. Llegada de la onda P picada en sismogramas registrados por 4 estaciones de la Red para el terremoto P0554629.

El software RFTN, además, dará la posibilidad de descartar aquellos sismogramas registrados de manera defectuosa dentro de los conjuntos de sismogramas registrados para un mismo terremoto. Esto puede ser debido al mal estado de la estación sísmica en el momento del registro o a la perturbación de la señal recibida por el acoplamiento de otra señal puntual o constante.

Algunos ejemplos de esos sismogramas defectuosos son los que se muestran en la Figura 4.10.

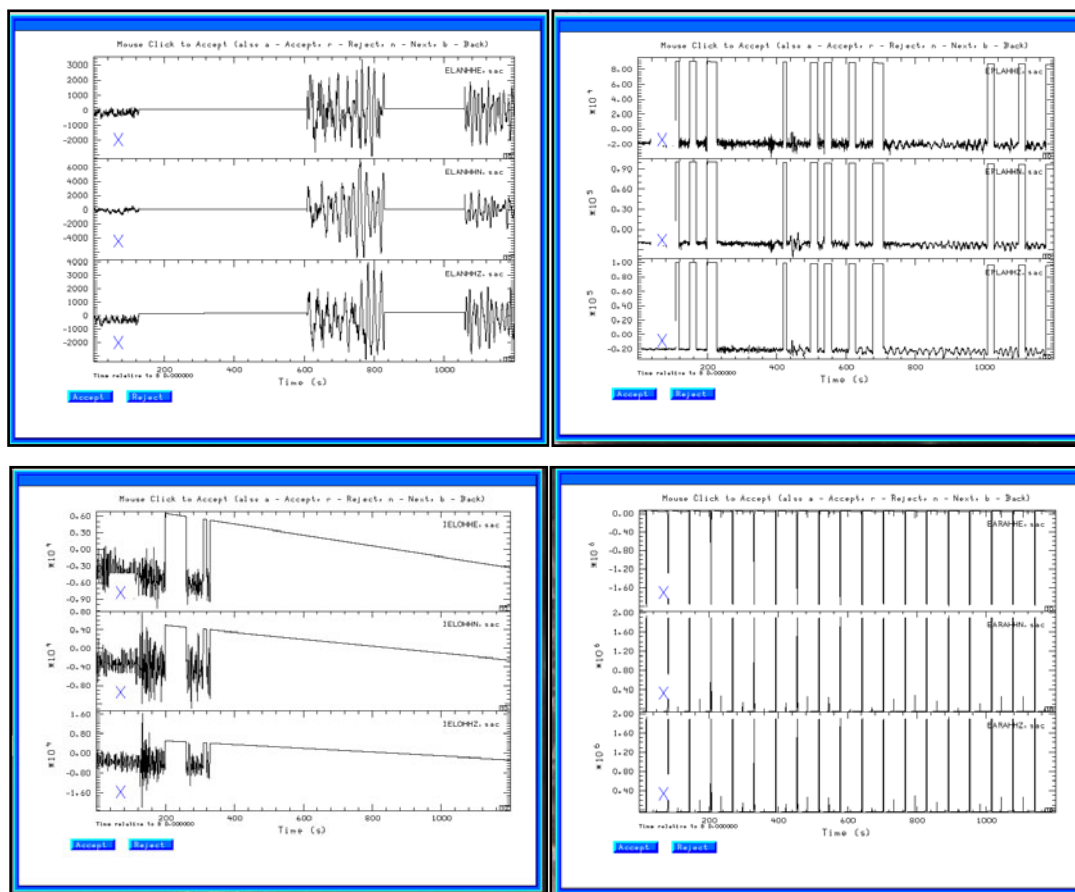
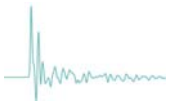


Figura 4.10. Sismogramas registrados de manera defectuosa y que son eliminados para el cálculo de la Función Receptora.

Desde el año 2003 al 2013, periodo elegido para la selección de los telesismos de este proyecto, la Red Sísmica Nacional ha sufrido numerosas modificaciones. El número de estaciones sísmicas ha ido aumentando, contando en 2003 con aproximadamente una treintena y llegando hasta las 55 en 2013. Además, hay que tener en cuenta que debido a la distancia al epicentro, no todos los telesismos han sido válidos para todas las estaciones de la Red.

En total han sido analizados 5231 sismogramas, obteniéndose el mismo número de funciones receptoras.



CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE LA FUNCIÓN RECEPTORA





5.1. Cálculo de las funciones receptoras de las estaciones

Con la metodología desarrollada en el capítulo 3, se ha procedido al cálculo de las Funciones Receptoras. A medida que se finalizaba dicho cálculo para el conjunto de estaciones que registraron el mismo evento, se ha ido generando una gráfica que recogiera todas esas funciones receptoras calculadas para un mismo telesismo. Todas estas gráficas, 186 en total, se recogen en el *Anexo II* (sólo en formato digital), que a su vez contiene la representación de las 5231 funciones receptoras calculadas.

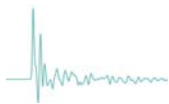
En el *Anexo III*, y como muestra la Figura 5.1. a modo de ejemplo, se pueden apreciar los telesismos que han participado en el cálculo de la función receptora de la componente radial de la estación EBAJ con los porcentajes de ajuste del cálculo de dicha función para cada telesismo registrado por la estación y, además, clasificados según el filtro gaussiano empleado. Así mismo, aparecen en rojo, aquellos telesismos que poseen un ajuste de la función receptora, inferior al 80% y que, por lo tanto, no deben considerarse.

Bajamar, EBAJ (Tenerife)

	FILTRO	AJUSTE (%)	FILTRO	AJUSTE (%)
1	R.EBAJHHZ20031340603.1.0	94,60	R.EBAJHHZ20031340603.2.5	85,60
2	R.EBAJHHZ20031340606.1.0	94,00	R.EBAJHHZ20031340606.2.5	85,61
3	R.EBAJHHZ20031710619.1.0	97,78	R.EBAJHHZ20031710619.2.5	94,15
4	R.EBAJHHZ20031711330.1.0	87,09	R.EBAJHHZ20031711330.2.5	88,60
5	R.EBAJHHZ20031962027.1.0	95,50	R.EBAJHHZ20031962027.2.5	94,15
6	R.EBAJHHZ20032740103.1.0	98,30	R.EBAJHHZ20032740103.2.5	96,55
7	R.EBAJHHZ20033561915.1.0	92,66	R.EBAJHHZ20033561915.2.5	90,05
8	R.EBAJHHZ20033600156.1.0	86,49	R.EBAJHHZ20033600156.2.5	78,64
9	R.EBAJHHZ20040962124.1.0	98,70	R.EBAJHHZ20040962124.2.5	97,67
10	R.EBAJHHZ20041240436.1.0	90,71	R.EBAJHHZ20041240436.2.5	81,97
11	R.EBAJHHZ20042501243.1.0	93,39	R.EBAJHHZ20042501243.2.5	86,18
12	R.EBAJHHZ20042832126.1.0	93,89	R.EBAJHHZ20042832126.2.5	89,95
13	R.EBAJHHZ20043200906.1.0	99,37	R.EBAJHHZ20043200906.2.5	98,89
14	R.EBAJHHZ20043492320.1.0	84,22	R.EBAJHHZ20043492320.2.5	75,05
15	R.EBAJHHZ20050120840.1.0	93,88	R.EBAJHHZ20050120840.2.5	87,55
16	R.EBAJHHZ20050801223.1.0	97,16	R.EBAJHHZ20050801223.2.5	93,57
17	R.EBAJHHZ20051642244.1.0	98,41	R.EBAJHHZ20051642244.2.5	97,64

Figura 5.1. Tabla del *Anexo III* correspondiente a la estación EBAJ (Bajamar, Tenerife). En ella aparecen los nombres de los archivos generados por RFTN en el cálculo de la función receptora de la componente radial para los filtros 1.0 y 2.5 junto con el porcentaje de ajuste de dicho cálculo. En rojo los que poseen un ajuste inferior al 80%.

También en el *Anexo III* se muestran una serie de figuras que corresponden a la función receptora promedio de la estación para los filtros 1.0 y 2.5 (Figura 5.2.), así como las secciones de las funciones receptoras en función del acimut inverso, es decir,



ordenadas según la dirección al hipocentro del telesismo (Figura 5.3); y del parámetro del rayo (Figura 5.4), o lo que es lo mismo, ordenadas por distancia, ya que a mayor distancia, menor será el parámetro del rayo, siendo éste la inversa de la velocidad de la onda en el punto dónde el rayo alcanza su mayor profundidad. Ambas mostradas para cada uno de los filtros.

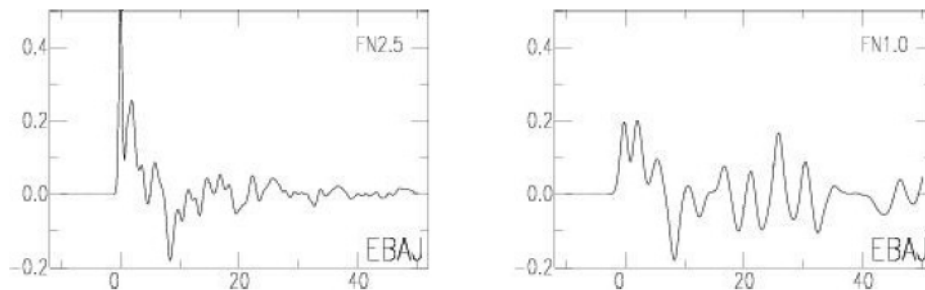


Figura 5.2. Representación gráfica de la función receptora promedio de la estación de EBAJ (Bajamar, Tenerife) para los filtros 1.0 y 2.5.

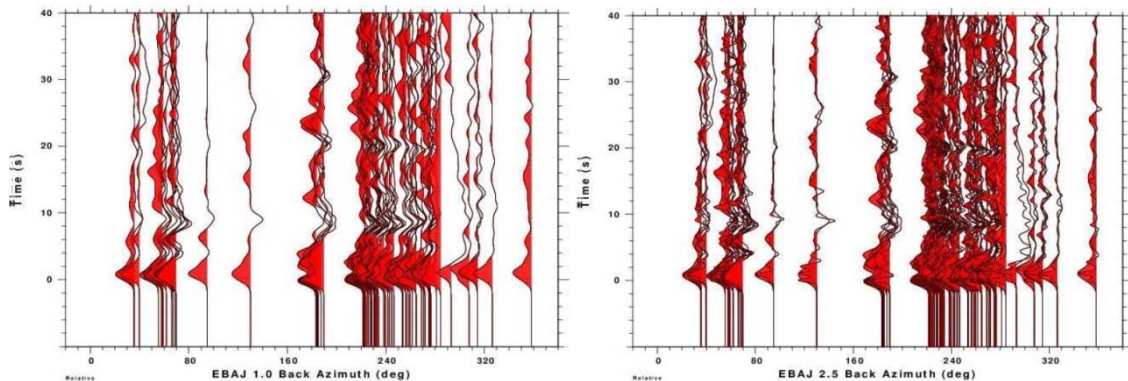


Figura 5.3. Sección de la función receptora, en función del acimut inverso, de la estación de EBAJ (Bajamar, Tenerife) para los filtros 1.0 y 2.5.

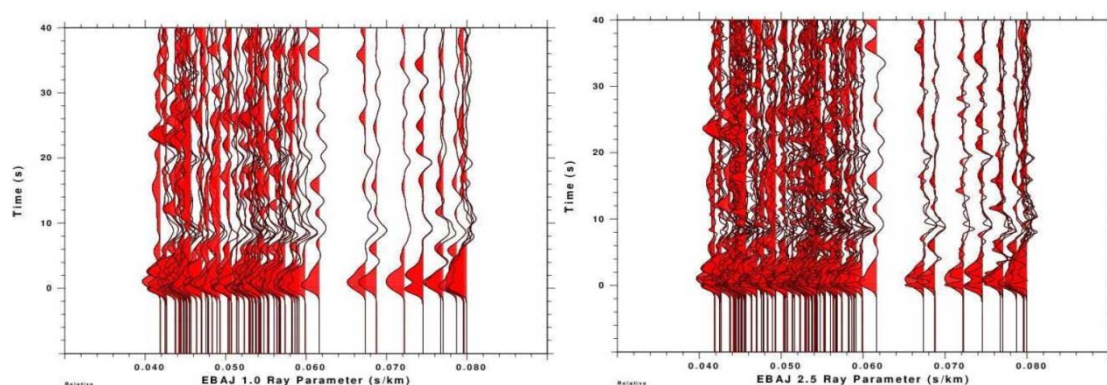


Figura 5.4. Sección de la función receptora, en función del parámetro del rayo, de la estación de EBAJ (Bajamar, Tenerife) para los filtros 1.0 y 2.5.

Es necesario comentar que según el trabajo reciente de Rueda y Mezcua (2015) las estaciones de CFUE y EALK estuvieron desorientadas durante un largo periodo de tiempo, por lo que hubiera sido necesario corregir esta desorientación. La estación de Fuerteventura (CFUE) permaneció desorientada $161,4^\circ$ desde 26 de julio



del 2006 hasta el 3 de mayo del 2008. Mientras que la estación de Alkurruntz (EALK, Navarra) permaneció desorientada $-125,9^\circ$ desde 22 de mayo del 2009 hasta el 23 de agosto del 2010. Si se separan las funciones receptoras correspondientes a estas fechas, puede apreciarse que la desorientación afecta a las funciones receptoras (Figura 5.5 y Figura 5.6). No será posible tener en cuenta estas funciones receptoras sin corregirlas de orientación previamente. Es por este motivo que en el *Anexo III* ambas estaciones tienen duplicadas las figuras, que corresponden a los periodos en los que la estación estuvo orientada y desorientada.

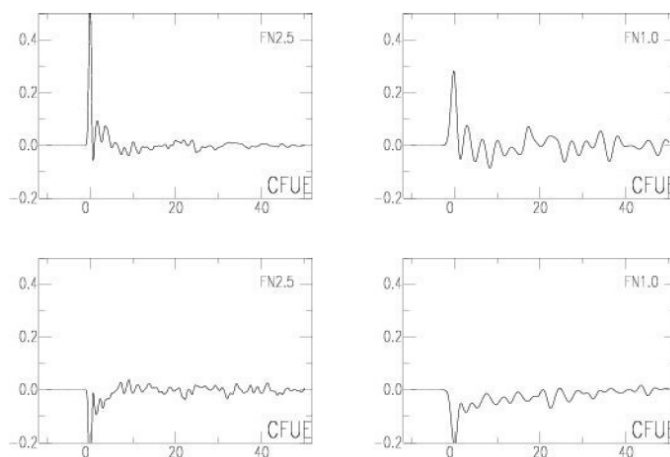


Figura 5.5. Función receptora promedio durante el periodo en el que la estación CFUE (Fuerteventura) permaneció orientada (arriba), Función receptora promedio durante el periodo en el que permaneció desorientada dicha estación (abajo).

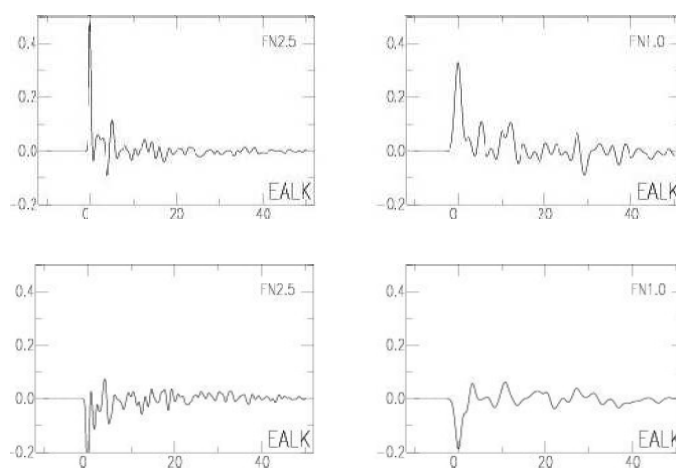
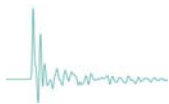


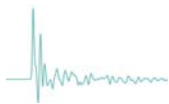
Figura 5.6. Función receptora promedio durante el periodo en el que la estación EALK (Alkurruntz, Navarra) permaneció orientada (arriba), Función receptora promedio durante el periodo en el que permaneció desorientada dicha estación (abajo).



Como se ha comentado en el apartado 3.4, únicamente se emplearán en el proceso de inversión, aquellas funciones receptoras que hayan sido calculadas con un ajuste USER5 superior al 80%. Siguiendo dicho criterio, se muestran las Tablas 5.1 y 5.2 que relacionan cada estación sísmica con las funciones receptoras calculadas para las mismas, mostrando el número de funciones que poseen ese ajuste superior al 80% y, también, con aquellas que no reúnen este requisito. Además en las Figuras 5.8. y 5.9, se ha representado dicha información en dos gráficas, una para cada filtro, con el objetivo de visualizar que estaciones han registrado un mayor número de telesismos válidos.

ESTACIÓN	F.R.VÁLID.	F.R. DESECH	TOTAL	% VÁLIDAS
ECHI	14	0	14	100,00%
CFUE	90	4	94	95,74%
EOSO	97	5	102	95,10%
EHIG	80	5	85	94,12%
EJON	127	8	135	94,07%
EIBI	128	9	137	93,43%
ETOS	111	8	119	93,28%
CRAJ	79	6	85	92,94%
EGOM	92	8	100	92,00%
ETOB	130	12	142	91,55%
EMIJ	106	10	116	91,38%
EGRO	123	12	135	91,11%
ECAL	131	13	144	90,97%
ELAN	132	14	146	90,41%
EMIR	45	5	50	90,00%
EMIN	133	15	148	89,86%
EPOB	133	15	148	89,86%
EMOS	140	16	156	89,74%
EBAD	102	13	115	88,70%
ERTA	123	16	139	88,49%
GUD	59	8	67	88,06%
EMUR	116	16	132	87,88%
EBIE	68	10	78	87,18%
EORO	33	5	38	86,84%
EFAM	92	14	106	86,79%
EQTA	96	15	111	86,49%
EMAZ	121	19	140	86,43%
EGOR	38	6	44	86,36%
EAGO	50	8	58	86,21%
ENIJ	43	7	50	86,00%
ELOB	121	20	141	85,82%
ELGU	28	5	33	84,85%
EBEN	78	14	92	84,78%
ESAC	122	22	144	84,72%
EPON	115	21	136	84,56%
EARI	125	24	149	83,89%
EBAJ	78	15	93	83,87%
ECAB	51	11	62	82,26%
EBER	106	23	129	82,17%
EADA	118	26	144	81,94%
ECHE	18	4	22	81,82%
IELO	35	8	43	81,40%
EARA	89	21	110	80,91%

ESTACIÓN	F.R.VÁLID.	F.R. DESECH	TOTAL	% VÁLIDAS
CFUE	90	4	94	95,74%
EMIR	47	3	50	94,00%
CRAJ	79	6	85	92,94%
ECHI	13	1	14	92,86%
EORO	35	3	38	92,11%
EMIJ	106	10	116	91,38%
ELGU	30	3	33	90,91%
ELAN	131	15	146	89,73%
EJON	121	14	135	89,63%
GUD	60	7	67	89,55%
ETOB	127	15	142	89,44%
EOSO	91	11	102	89,22%
EMIN	131	17	148	88,51%
EIBI	120	17	137	87,59%
ECAL	126	18	144	87,50%
EGOM	87	13	100	87,00%
EGRO	117	18	135	86,67%
ETOS	103	16	119	86,55%
ERTA	120	19	139	86,33%
YARA	25	4	29	86,21%
EBIE	67	11	78	85,90%
EFAM	91	15	106	85,85%
EPOB	127	21	148	85,81%
EPLA	60	10	70	85,71%
YSOS	24	4	28	85,71%
EMUR	113	19	132	85,61%
EBAD	98	17	115	85,22%
EMLI	23	4	27	85,19%
EHIG	72	13	85	84,71%
EMOS	132	24	156	84,62%
ELOB	119	22	141	84,40%
ESAC	120	24	144	83,33%
EAGO	48	10	58	82,76%
EBEN	76	16	92	82,61%
ECAB	51	11	62	82,26%
ENIJ	41	9	50	82,00%
RETOR	41	9	50	82,00%
EQTA	91	20	111	81,98%
EADA	118	26	144	81,94%
EGOR	36	8	44	81,82%
IELO	35	8	43	81,40%
EARA	89	21	110	80,91%
EARI	120	29	149	80,54%



CTIG	28	7	35	80,00%
EPLA	56	14	70	80,00%
EZAM	12	3	15	80,00%
ESPR	105	27	132	79,55%
YARA	23	6	29	79,31%
EQES	114	31	145	78,62%
YSOS	22	6	28	78,57%
RETOR	39	11	50	78,00%
EALB	59	17	76	77,63%
EALK	98	31	129	75,97%
EMLI	20	7	27	74,07%
ECEU	40	23	63	63,49%

EPON	109	27	136	80,15%
CTIG	28	7	35	80,00%
EMAZ	112	28	140	80,00%
EZAM	12	3	15	80,00%
EBAJ	74	19	93	79,57%
EQES	113	32	145	77,93%
EBER	100	29	129	77,52%
ECHE	17	5	22	77,27%
ESPR	102	30	132	77,27%
EALK	99	30	129	76,74%
EALB	55	21	76	72,37%
ECEU	42	21	63	66,67%

Tabla 5.1 y Tabla 5.2. Clasificación de estaciones sísmicas ordenadas de manera descendente según el porcentaje de FR aptas para el estudio, calculadas para los filtros 1.0 (izquierda) y 2.5 (derecha).

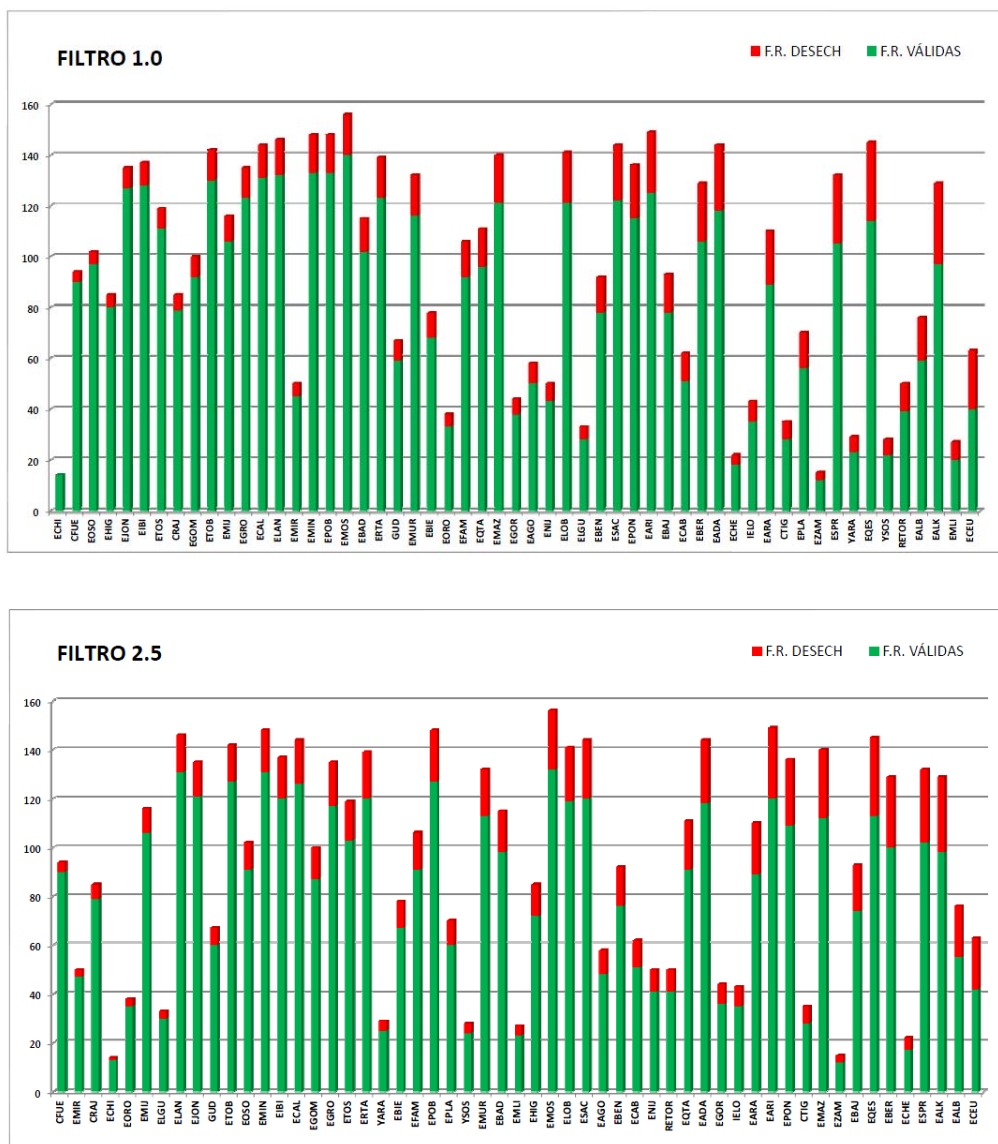


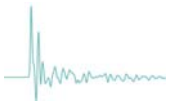
Figura 5.8. y Figura 5.9. Gráficas que representan la información de la Tabla 5.1. (arriba) y 5.2. (abajo), referente al número de Funciones Receptoras válidas (porcentaje superior al 80%) pertenecientes a las estaciones de la Red Sísmica del IGN calculadas para el filtro 1.0 y 2.5, respectivamente.



Se observa que empleando el filtro 1.0 hay un total de quince estaciones cuyas funciones receptoras válidas son más del 90% de las funciones calculadas. Además, destaca el hecho de que cinco de las diez primeras, sean estaciones que pertenecen a las Islas Canarias. La estación de Ceuta, ECEU, es la estación que presenta un peor porcentaje de uso, con bastante diferencia respecto a las demás, menos del 65% de sus funciones receptoras calculadas son aptas para el estudio. Este hecho puede ser debido a que la estación de ECEU junto a las estaciones de EALB (Isla de Alborán) y EMLI (Melilla), son de las estaciones más ruidosas de la Red. Además, observamos que entre las estaciones que figuran con un menor porcentaje de funciones receptoras válidas se encuentra también la estación EALK (Alkurruntz, Navarra), hecho que puede ser consecuencia del periodo en el que ésta estuvo desorientada.

Con el filtro 2.5, se aprecia que el número de estaciones con un porcentaje de uso superior al 90% se reduce a siete, aunque también se reducen, en una estación, las estaciones que poseen un porcentaje inferior al 70%. La mayor parte de las estaciones, cuarenta de ellas, tienen un porcentaje comprendido entre 80% y 90%.

La primera conclusión que se puede obtener es que los resultados, aunque algo inferiores para el filtro 2.5, son bastante similares, de manera conjunta, para ambos filtros. El porcentaje de funciones receptoras válidas por estación es prácticamente el mismo, aproximadamente del 85% para los dos filtros. Ahora bien, realizando un análisis de manera más individual, se observa que no a todas las estaciones les beneficia el empleo del mismo filtro. Aunque por norma general las estaciones ocupan posiciones (en cuanto a porcentaje) semejantes en ambas tablas, en algunas la posición difiere sustancialmente según el filtro utilizado. Es el caso, por ejemplo, de la estación EHIG (Higuera, La Palma) que reduce su promedio del 94,12 % al 84,71% al pasar del filtro 1.0 al 2.5. Por el contrario, la estación de EMLI (Melilla) aumenta del 74,07% al 85,19% al cambiar de filtro en el mismo sentido que la anterior estación.



CAPITULO 6: OBTENCIÓN DEL MODELO DE VELOCIDAD MEDIANTE INVERSIÓN DE LA FUNCIÓN RECEPTORA PARA LA ESTACIÓN DE TOBARRA



6.1. Inversión de la función receptora para obtener el modelo de velocidad en la estación de Tobarra

A modo de ejemplo, se llevará a cabo la inversión en una de las estaciones de la RSN, con el objetivo de mostrar la finalidad de todo el trabajo realizado hasta el momento.

La estación elegida para llevar a cabo esta muestra será la estación de Tobarra, en Albacete.

6.1.1. Inversión

Con la realización de la inversión de la función receptora se pretende obtener una modelización de la estructura de velocidades de la onda S bajo la estación sísmica en cuestión. Para llevarla a cabo, se empleará de nuevo el RFTN96.

La inversión se llevará a cabo únicamente para la componente radial de las funciones receptoras, ya que es la que registra con mayor energía la onda P y sus transformadas. Además, sólo se emplearán las que hayan sido calculadas con los filtros 1.0 y 2.5 porque son los que mejor resultado proporcionan. También será necesario desechar aquellas funciones que posean un ajuste inferior al 80%, siendo éstas un total de 37 funciones receptoras (29 pertenecientes al filtro 2.5 y 8 al filtro 1.0). Por tanto, finalmente, participarán en el proceso un total de 220 funciones receptoras. En las Figuras 6.1. y 6.2. se muestran las localizaciones de los telesismos a los que pertenecen esas 220 funciones receptoras.

Una vez seleccionadas las funciones receptoras que participarán en el cálculo del modelo, se creará un fichero llamado *rftn.lst* con los nombres de los archivos que contienen la información referente a esa componente de las funciones. También se necesitará en este procedimiento un modelo inicial, con espesores de capas y velocidades de propagación de la onda S predeterminados, así como un fichero de parámetros iniciales, a partir de los cuales, el programa pueda realizar el cálculo.

El modelo inicial de velocidades empleado para la inversión (Figura 6.3), es una versión modificada del modelo ak135-F (Kennett *et al.* 1995) que contiene un modelo isotrópico de tierra esférica y de velocidades de ondas S constantes.

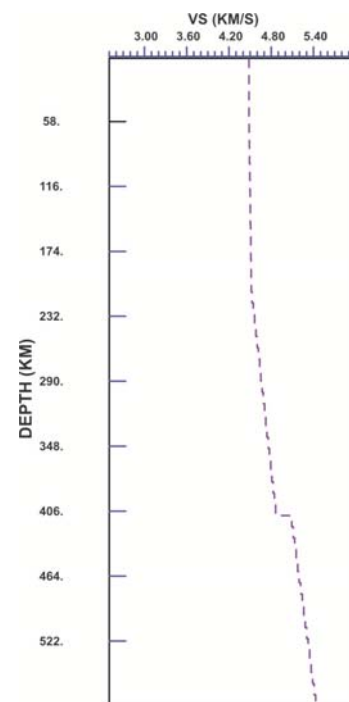


Figura 6.3. Modelo de velocidades ak135-F (Kennett *et al.* 1995)

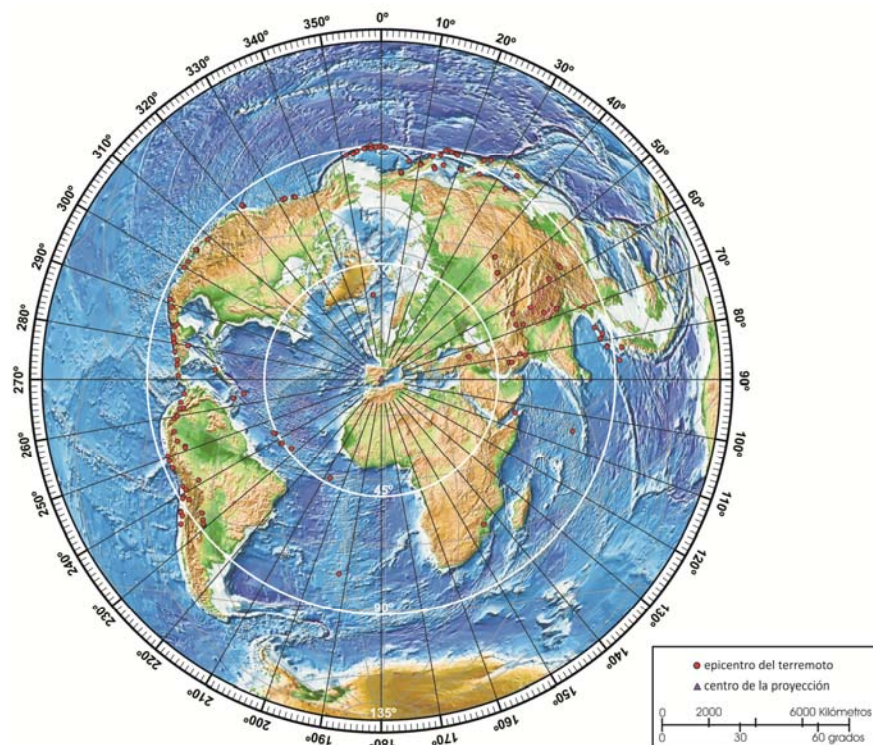
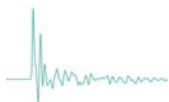


Figura 6.1. Telesismos empleados para el cálculo de la función receptora promedio de la estación de Tobarra, Albacete para el filtro 1.0.

Proyección acimutal equidistante centrada en Tobarra (λ , $-1^{\circ} 32' 52''$; ϕ , $38^{\circ} 38' 41''$)

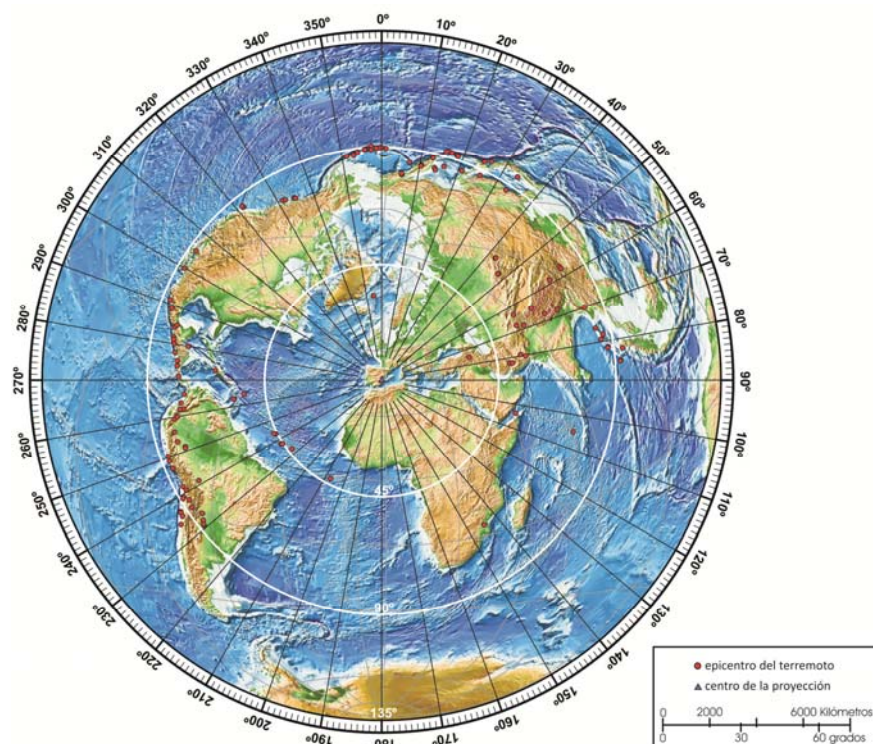
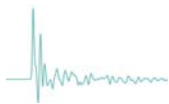


Figura 6.2. Telesismos empleados para el cálculo de la función receptora promedio de la estación de Tobarra, Albacete para el filtro 2.5.

Proyección acimutal equidistante centrada en Tobarra (λ , $-1^{\circ} 32' 52''$; ϕ , $38^{\circ} 38' 41''$)



La inversión modificará de manera diferente las velocidades del modelo inicial, aplicando una ponderación diferente en función de la profundidad. Así la estructura más profunda no se verá modificada, las velocidades comprendidas entre 50-100 Km de profundidad tendrán ponderación intermedia y las superiores a 50 Km podrán sufrir grandes variaciones. Tal y como aparece en el script *DOIT.deep*, con el que se da comienzo al proceso.

Los valores de dicho modelo inicial aparecen en el *Anexo IV*. En él, la información del modelo aparece clasificada por columnas. De izquierda a derecha, se muestra la profundidad, las velocidades de las ondas P y S, la densidad, el factor de atenuación,...

Se ha decidido hacer un total de 12 iteraciones, que irán mejorando una tras otra la inversión.

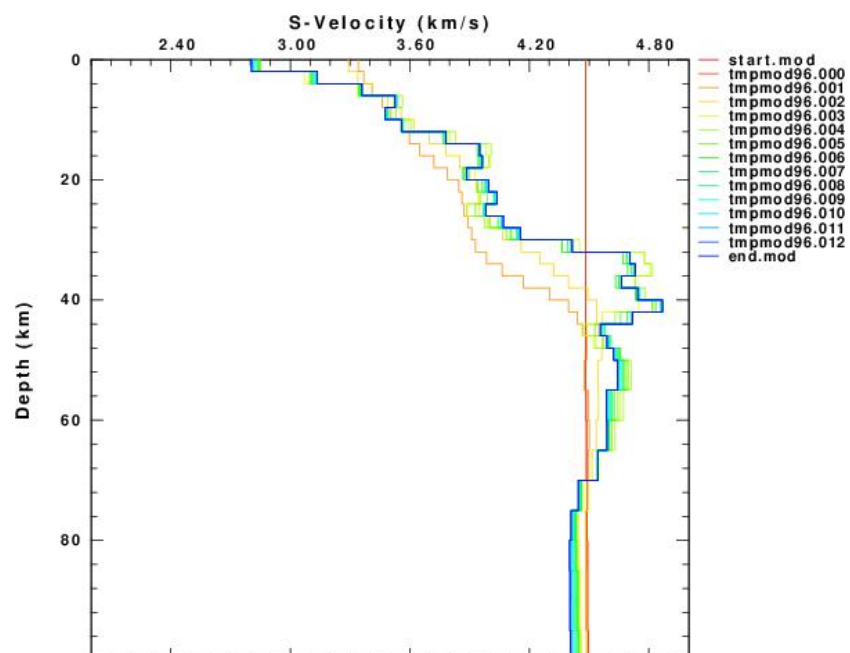
Con el resultado del modelo final se calculan las funciones receptoras sintéticas que se comparan con las calculadas. El porcentaje de ajuste entre unas y otras se encuentra en el fichero *rftn.tmp*, el cuál se analizará y se eliminarán aquellas que no superen el 50%. Una vez llevado a cabo el descarte, se repetirá de nuevo el proceso.

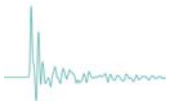
6.1.2. Resultados

Una vez realizadas las iteraciones correspondientes con todas las funciones superando el 50%, el software genera el modelo final, con el nombre *end.mod*, mostrado en el *Anexo V*.

El modelo final obtenido aparece en color azul en la Figura 6.4. acompañado del modelo inicial, en rojo, y de cada una de las doce iteraciones que el programa RFTN96 ha realizado. Mediante esta figura, se aprecia la evolución del modelo tras cada una de las iteraciones, hasta llegar al modelo final.

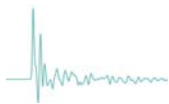
Figura 6.4. Evolución del modelo de inversión de la función receptora. En la leyenda de la derecha muestra la relación de colores e iteraciones, desde el modelo inicial en rojo hasta el modelo final en azul.





Una vez obtenido el modelo final, se pueden extraer algunas conclusiones acerca de la estructura bajo el receptor de la estación de Tobarra. Se puede apreciar que la profundidad del Moho es de aproximadamente 33 Km. También se observa una discontinuidad importante a unos 15 Km de profundidad, así como una capa superficial de baja velocidad que puede llegar hasta los 3 Km.

RFTN96 también da la posibilidad, como muestra la Figura 6.5 de ver el ajuste final de cada una de las funciones receptoras que finalmente han participado en la inversión. A continuación se muestran las 220 funciones receptoras calculadas (en azul), comparadas individualmente con la función receptora sintética (en rojo), calculada a partir del modelo de velocidad de onda S obtenido.



OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN RECEPTORA EN LAS ESTACIONES SÍSMICAS DE BANDA ANCHA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

Capítulo 6. Obtención de modelos de velocidad mediante inversión de la función receptora para la estación de Tobarra

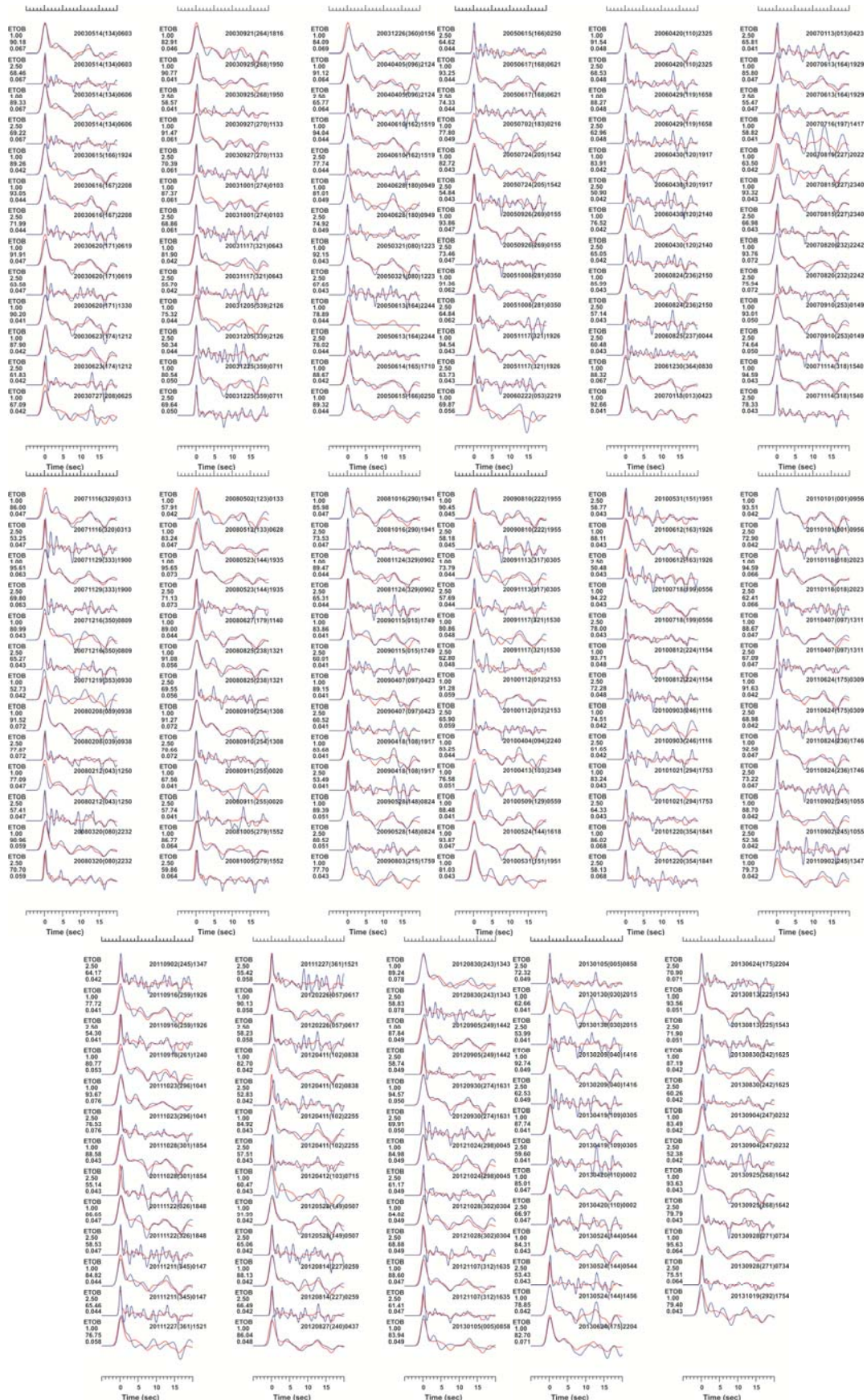
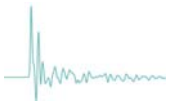


Figura 6.5. Ajuste final de cada una de las 220 funciones receptoras que han participado en la inversión.

En rojo, función receptora sintética, y en azul, cada una de las funciones receptoras calculadas.



CAPITULO 7: CONCLUSIONES





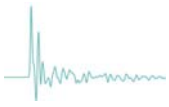
Finalmente, cabe resaltar que para llegar a esos 186 telesismos empleados en el cálculo de la función receptora, ha sido necesario someter a los datos de partida a un proceso de selección contante durante todo el proyecto, con el objetivo de obtener unos resultados de la mayor calidad posible. Cientos de sismos han sido desechados por no reunir las condiciones necesarias para el estudio. Además, unos dos mil sismogramas se han quedado fuera del catalogo generado por ese conjunto de telesismos anteriormente mencionados ya que, al presentar defectos en su registro, no reunían las condiciones necesarias para el cálculo. Estos defectos pueden ser motivados por el estado de las estaciones sísmicas en el momento de sus registros, ya sea por el mal estado de las mismas o por interrupciones en el momento de la transmisión.

La Red Sísmica Nacional, tecnológicamente, es una de las más avanzadas del mundo, pero es lógico que al realizarse una explotación tan amplia como la llevada a cabo en este proyecto, haya determinados periodos en los cuales alguna de las estaciones no se encontraran en las condiciones deseadas, aunque bien es cierto que se ha tratado de algunos casos aislados. Se puede afirmar que se ha conseguido un catálogo de funciones receptoras muy amplio y de gran calidad, gracias al cual hemos podido calcular las funciones receptoras promedio de las 55 estaciones de la red de manera satisfactoria, empleando, en la mayoría de ellas, más de cien funciones para dicho cálculo.

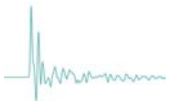
Por otro lado, en el capítulo 3 se hace mención de la importancia del empleo de un filtro adecuado en el cálculo de la función receptora. A la vista de nuestros resultados para los filtros 1.0 y 2.5, se puede decir que en líneas generales, tanto con uno como con otro, se han obtenido resultados similares. Si bien es cierto, que de manera individual, en determinadas estaciones con el uso de uno u otro filtro se han obtenido resultado sustancialmente diferentes. Es el caso, por ejemplo, de la estación EHIG o EMLI, para las que el empleo de un mismo filtro en el cálculo de sus funciones receptoras puede tener efectos adversos.

En líneas futuras, en este trabajo se presenta una buena base para llevar a cabo el proceso comentado al inicio de este documento, el de la inversión de las funciones receptoras con el objetivo de obtener un modelo de la estructura litosférica más realista del actualmente conocido para el territorio español. Muestra de ello, son los buenos resultados obtenidos en la inversión llevada a cabo a modo de ejemplo de la estación ETOB, en los que se aprecia un modelo de velocidades totalmente lógico que da una idea aproximada de cómo puede ser la estructura de la litosfera bajo dicha estación.

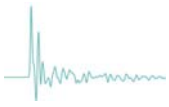
Así mismo, otra posible aplicación de la función receptora de la que se ha sido consciente durante la realización de este proyecto, es la del posible empleo de la misma como herramienta para la supervisión y control del estado de las estaciones de



la red, como se ha podido observar en el Capítulo 5 con la desorientación durante un periodo de tiempo de las estaciones de Fuerteventura y Alkurruntz, patente en los resultados de sus funciones receptoras promedio.



REFERENCIAS





Ammon, C. J. (1991). The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms, *Bull. Seism. Soc. Am.* **81**, 2504-2510.

Clayton, R. W. y R. A. Wiggins (1976). Source shape estimation and deconvolution of teleseismic body waves, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **47**, 151-177.

Díaz, J. y J. Gallart (2009). Crustal structure beneath the Iberian Peninsula and surrounding waters: a new compilation of deep seismic sounding results. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **173**, 181–190.

Díaz, J., D. Pedreira, M. Ruiz, J.A. Pulgar y J. Gallart (2012). Mapping the indentation between the Iberian and Eurasian plates beneath the Western Pyrenees/Eastern Cantabrian Mountains from receiver function analysis, *Tectonophysics*, **570–571**, 114–122.

Federation of Digital Seismograph Networks (2012). Standard for the Exchange of Earthquake Data SEED Format Version 2.4 SEED Reference Manual, Incorporated Research Institutions for Seismology, 224 pp.

Herrmann, R. B. y C. J. Ammon (2002). Surface waves, receiver functions and crustal structure. Computer programs in seismology. SLU, 110 pp.

Herrmann R. B., C. J. Ammon y K. D. Koper (2004). GSAC - Generic Seismic Application Computing, Fall AGU Meeting, San Francisco, CA.

Julià, J., J. Vila y R. Macià (1998). The receiver structure beneath the Ebro basin, Iberian Peninsula, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 1538-1547.

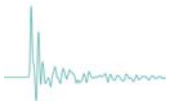
Kennett B.L.N., E.R. Engdahl y R. Buland (1995). Constraints on seismic velocities in the earth from travel times, *Geophys. J. Int.* **122**, 108-124.

Langston, C. A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic bodywaves, *J. Geophys. Res.* **84**, 4749-4762.

Lomax, A.J. (1991). User Manual for SeisGram. In *Digital Seismogram Analysis and Waveform Inversion*, IASPEI Software Library Volume 3, W.H.K. Lee, ed., Seismological Society of America.

Meijde van der M., van der L. Suzany D. Giardini (2003). Crustal structure beneath broad-band seismic stations in the Mediterranean region, *Geophys. J. Int.*, **152**, 729–739.

Owens, T. J., G. Zandt y S. R. Taylor (1984). Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: a detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7783-7795.



Phinney, R. A. (1964). Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long-period bodywaves, *J. Geophys. Res.* **69**, 2997-3017.

Rueda, J. y J. Mezcua (2015). Orientation analysis of the Spanish Broadband National Network using Rayleigh-wave polarization. *Seism. Res. Lett.* **86**, 929-940.

Wessel, P. y W.H.F. Smith (1998). New, improved version of the generic mapping tool released, *EOS Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579.